



Análisis de las PTAR en Quintana Roo para cumplir con la nueva normativa (NOM-001)

México



Financiado por



Co-implementado por



Co-ejecutado por



El desarrollo del Análisis de las PTAR en Quintana Roo para cumplir con la nueva normativa (NOM-001) fue liderado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) del Gobierno de México y financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) bajo el Proyecto GEF CReW+.

El GEF CReW+ es un proyecto de asociación financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés) que está siendo implementado conjuntamente por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en 18 países de la Región del Gran Caribe (RGC).

Este proyecto se basa en su anterior fase exitosa del proyecto “El Fondo Regional del Caribe para la Gestión de Aguas Residuales (CReW)” (2011-2017). CReW+ está siendo ejecutado por Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, la Organización de los Estados Americanos (OEA) y la Secretaría del Convenio de Cartagena (CAR/RCU) en nombre del BID y el PNUMA, respectivamente.

Los 18 países participantes en el CReW+ (Barbados, Belice, Colombia, Costa Rica, Cuba, República Dominicana, Grenada, Guatemala, Guyana, Honduras, Jamaica, México, Panamá, Saint Kitts and Nevis, Saint Lucia, St. Vincent and the Grenadines, Surinam, Trinidad y Tobago) varían geográficamente, desde grandes países continentales hasta pequeños estados insulares con contextos políticos, lingüísticos y culturales significativamente diferentes.

Sobre el GEF: el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés) ha proveído de \$22 millones en donaciones y blended finance y ha movilizado cerca de \$120 billones en cofinanciamiento en más de 5200 proyectos y programas. El GEF es el fondo fiduciario más grande enfocado en permitir a países en desarrollo invertir en la naturaleza y apoya la implementación de convenios internacionales en biodiversidad, cambio climático, químicos y desertificación. Reúne 184 gobiernos, adicionalmente sociedad civil, organizaciones internacionales, sector privado y aliados.

Publicado por:	<i>Proyecto GEF CReW+ Implementando soluciones para la gestión integrada del agua y las aguas residuales para un Caribe limpio y saludable</i>
Autores:	<i>AyMA Ingeniería y Consultoría S.A. de C.V.</i>
Diseño:	<i>Proyecto GEF CReW+</i>
Fecha:	<i>Marzo 2023</i>
Encargado por:	<i>Grupo de Coordinación Inter-Agencial (IACG por sus siglas en Ingles)</i>

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los/as autores/as y no necesariamente reflejan los puntos del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF por sus siglas en inglés), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Secretaría del Convenio de Cartagena (CAR/RCU), Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, la Organización de los Estados Americanos (OEA) o los países que representan.

El uso comercial no autorizado de los documentos está prohibido y puede ser sancionado según las políticas de las agencias y/o las leyes aplicables.

www.gefcrew.org

Indice

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Bicentenario (Tulum) - Pag. 4

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Caribe - Pag. 86

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Centenario - Pag. 160

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR El Rey - Pag. 232

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Gucumatx - Pag. 306

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Norponiente - Pag. 382

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Saas Tun Ha - Pag. 456

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Sur - Pag. 526

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR San Miguelito (Cozumel) - Pag. 597

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Playacar - Pag. 674

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Pok Ta Pok - Pag. 736

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Norte - Pag. 807

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Bicentenario (Tulum)

Contenido

PTAR Bicentenario	1
Contenido	4
Índice de Tablas	5
Índice de Figuras.....	7
1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más.....	9
Descripción general de la PTAR Bicentenario	9
Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases	10
Descripción general del proceso	11
Diagrama de flujo de proceso	13
Descripción de las unidades de proceso	14
Tren de Tratamiento de Agua	14
Tren de Tratamiento de Lodos	25
Estado de conservación y operación de las instalaciones PTAR Bicentenario de Tulum	32
Análisis de calidad del agua cruda.....	35
Calidad de agua cruda, histórica	35
Calidad de agua cruda, de este Estudio	35
Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada.....	38
Calidad de agua tratada, histórica.....	38
Calidad de agua tratada, de este Estudio.....	42
Parámetros de operación del reactor de lodos activados	45
Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua	46
Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que	

conduce las aguas residuales a la PTAR	48
Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) de cada planta	48
Estimación de los costos de operación y mantenimiento	50
Observaciones y recomendaciones generales	55
2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	57
Plantas de tratamiento de agua residual de la CAPA.....	57
PTAR Bicentenario, Tulum.....	57
3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	64
Techo financiero	64
Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales	66
Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares	70
Resumen de inversión, techo financiero.....	74
4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	78
Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	78
Aspectos Clave de los Lineamientos	79
Programa de inversión anual	81
Bibliografía.....	85

Índice de Tablas

Tabla 1: Dimensiones Filtro Rociador.....	15
Tabla 2: Dimensiones Reactores de Lodos Activados PTAR Bicentenario	16
Tabla 3: Dimensiones Clarificador Secundario PTAR Bicentenario	17
Tabla 4: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua.....	23

Tabla 5: Dimensiones Digestor de Lodos PTAR Bicentenario	25
Tabla 6: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo	29
Tabla 7: Calidad de agua residual cruda (mg/L)	35
Tabla 8: Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente	37
Tabla 9: Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)	40
Tabla 10: Caracterización del agua tratada de este Estudio (<i>E. coli</i> y Huevos de helminto) ...	43
Tabla 11: Cumplimiento del agua tratada	44
Tabla 12: Oxígeno disuelto y Sólidos Sedimentables en reactor de lodos activados de la PTAR	45
Tabla 13: Coordenada de pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR	46
Tabla 14: Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales	50
Tabla 15: Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M.	52
Tabla 16: Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Bicentenario	58
Tabla 17: Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Bicentenario	59
Tabla 18: Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio	65
Tabla 19: Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	74
Tabla 20: Monto de inversión, millones de pesos.....	75
Tabla 21: Estimación detallada de costos PTAR Bicentenario	76
Tabla 22: Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado	82

Índice de Figuras

Figura 1 Vista Aérea PTAR Bicentenario Tulum.....	9
Figura 2 Diagrama de flujo de proceso actual PTAR Bicentenario	13
Figura 3 Arreglo general de unidades de la PTAR Bicentenario de Tulum (CAPA, 2022)	18
Figura 4 Plataforma de pretratamiento y cárcamo de recepción de pipas	19
Figura 5 Cárcamo de recepción de pipas, zona de cribado y bombas de agua residual.....	19
Figura 6 Equipo de pretratamiento Ro 5.....	19
Figura 7 Caja de distribución en plataforma de pretratamiento	20
Figura 8 Filtro rociador con brazo distribuidor sin movimiento y cárcamo de elevación de agua de filtro rociador.....	20
Figura 9 Tanque de lodos activados con aeración difusa, con pasillo de operación caído.....	21
Figura 10 Clarificación secundaria de puente fijo, cableado eléctrico inadecuado.....	21
Figura 11 Vertedor efluente y mamparas de clarificador secundario	21
Figura 12 Estación de desinfección ultravioleta con deterioro severo, estructura de lámparas UV abandonadas	22
Figura 13 Pozo de infiltración de agua tratada	22
Figura 14 Cárcamo de recirculación de lodos secundarios	26
Figura 15 Digestor aerobio de lodos	27
Figura 16 Espesador de lodos.....	27
Figura 17 Equipo preparador de polímero y filtro banda fuera de operación.....	27
Figura 18 Edificio de manejo de lodos	28
Figura 19 Caseta de sopladores para proceso de agua y de digestión de lodos.....	28
Figura 20 Caracterización del agua cruda (oct-nov-2022)	37
Figura 21 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021).....	41
Figura 22 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT).....	42

Figura 23 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)	43
Figura 24 Análisis en campo PTAR Bicentenario	46
Figura 25 Pozos de infiltración PTAR Bicentenario	47
Figura 26 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m ³	53
Figura 27 Diagrama de flujo de la PTAR Bicentenario con las acciones propuestas.....	63
Figura 28 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	75
Figura 29 Inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR Bicentenario, mdp's	84

1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más

Descripción general de la PTAR Bicentenario

La PTAR Bicentenario de Tulum se localiza al noroeste de la población y proporciona el servicio de tratamiento al agua residual de origen municipal y de los usos comercial, servicios y hotelero generadas en su zona de servicio, que corresponde a la cabecera municipal. El responsable de la operación y mantenimiento de la PTAR es CAPA Organismo Operador de Tulum. En la Figura 1 se presenta la vista general satelital de la PTAR Bicentenario.



Figura 1 Vista Aérea PTAR Bicentenario Tulum

Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases

La PTAR Bicentenario inició operaciones en 2010, a la par de la celebración del bicentenario de la independencia. La PTAR está diseñada para una capacidad de 120 L/s con un proceso biológico de tipo dual con filtro rociador y lodos activados, y el tratamiento de lodo es con digestión aerobia y desaguado mecánico de lodo.

La información de CAPA indica que el caudal medio tratado en el año 2021 fue de 55 L/s, menos de la mitad del diseño. A continuación, se indican las operaciones y procesos que conforman el tren de tratamiento de la PTAR Bicentenario de Tulum, se indica entre paréntesis el número de unidades de cada uno:

Tren de tratamiento de agua:

- + Tanque de recepción de aguas residuales y sedimentos de pipas (1)
- + Pretratamiento compacto automático: criba, desarenación y desengrasado (1)
- + Filtro rociador (1)
- + Reactor de lodos activados (2), aireación difusa
- + Clarificación secundaria (1)
- + Desinfección originalmente con cloro gas, adaptada para desinfección UV (no opera)
- + Pozo de infiltración de agua tratada (1)

Tren de tratamiento de lodos:

- + Espesamiento gravitacional (1) en tanque circular (no opera)
- + Digestión aerobia (1), aireación difusa (no opera)
- + Desaguado mecánico (1), en filtro banda (no opera)
- + Destino del lodo desaguado, se dispone húmedo en terrenos de la propia planta

Diversas partes de la PTAR se encuentran fuera de operación, lo que se especificará con más detalle posteriormente. Los obstáculos que ha enfrentado el saneamiento en este municipio tienen que ver con dos principales factores:

- + La población de Tulum experimenta un acelerado crecimiento urbano y poblacional, derivado de esto existen proyectos de nuevos desarrollos urbanos que pudieran duplicar la generación de aguas residuales en 10-15 años, lo cual requerirá de importantes inversiones en colección, conducción y tratamiento de aguas residuales.
- + La cobertura de alcantarillado de la población, derivado también de la velocidad de crecimiento, es baja, inferior al 50%. Esto provoca que una parte importante del influente a la PTAR se alimente por pipas, algunas de las cuales puede contener inhibidores para el tratamiento biológico del agua.

Actualmente, existe un proyecto de reingeniería y ampliación de la PTAR para 240 L/s (CAPA, 2022). Aunque, como se verá más adelante, las necesidades de la PTAR son variadas y van más allá de una ampliación a su capacidad de tratamiento.

Descripción general del proceso

La corriente de agua residual proveniente del sistema de alcantarillado ingresa bombeada directamente a la plataforma de pretratamiento, sin necesidad de un cárcamo de bombeo interno. Además de esta corriente, la PTAR cuenta también con un cárcamo de recepción de agua de pipas, el cual, debido a la poca cobertura de alcantarillado, representa una importante fuente del agua residual ingresada a la PTAR.

El agua residual del alcantarillado y de las pipas ingresa hacia la unidad de pretratamiento compacta. Esta unidad conjunta una criba rotatoria automática, así como un tanque de desarenación y remoción de grasas. El equipo se refiere con frecuencia con su modelo, Ro5, y existe en todas las PTAR de la CAPA. Al momento de la visita, el equipo presentaba deterioro severo y se encontraba fuera de operación.

De la unidad de pretratamiento el agua es conducida a una caja de distribución y al tratamiento Dual conformado por un filtro rociador y un reactor de lodos activados. El diseño original contemplaba la distribución mediante esta caja del 50% del caudal influente hacia el filtro rociador y el restante 50% directamente al reactor de lodos activados. En la actualidad, debido al deterioro de la conducción hacia el reactor de lodos activados, todo el caudal de agua residual ingresa al filtro rociador.

El filtro rociador se compone de un brazo distribuidor rotatorio y un cárcamo de recirculación y elevación de agua. En su operación normal, el agua que ingresa a esta unidad es distribuida sobre un empaque ordenado, sobre el cual se desarrollan microorganismos y se lleva a cabo la remoción de materia orgánica. El cárcamo posterior recircula una parte del agua de vuelta al filtro para propiciar un mojado constante del medio.

Actualmente el motor del brazo mecánico del filtro rociador se encuentra fuera de operación, además que presenta obstrucciones en algunas de las ventanas efluentes del brazo. Por esta razón, el agua ingresada al filtro no se distribuye uniformemente sobre el filtro, lo que impacta negativamente en su desempeño.

La conducción del agua residual a través del filtro rociador tiene poco impacto en la remoción de materia orgánica, sin embargo, sigue siendo útil gracias al cárcamo de elevación posterior. Este cárcamo de bombeo alimenta al reactor de lodos activados, lo que no se puede realizar por gravedad desde la plataforma de pretratamiento, para continuar con el proceso de tratamiento.

Desde el cárcamo de recirculación y elevación del filtro rociador, se bombea una corriente de agua hacia uno de los dos reactores de lodos activados. Esta unidad es de tipo convencional y

mezcla completa y cuenta con aireación de burbuja fina. El efluente de esta unidad se dirige hacia el clarificador secundario existente donde se da la separación de los biosólidos del agua.

El agua clarificada es conducida hacia la desinfección. En el diseño original, la desinfección se realizaba por un sistema de desinfección UV. En la actualidad, el equipo UV se encuentra fuera de servicio, por lo que la desinfección se realiza con hipoclorito de sodio y pastillas de cloro. El agua tratada se destina hacia un pozo de infiltración sin ningún destino de reúso.

El lodo secundario purgado del clarificador se envía hacia el digestor aerobio de lodos. La PTAR cuenta con un sistema de espesado de lodos y natas posterior al digestor, que funciona mediante una recirculación constante entre esta unidad y el digestor aerobio. En la actualidad el digestor aerobio de lodos se encuentra fuera de servicio, por lo que se tiene deshabilitado el espesado de lodos también.

En el diseño original, el lodo efluente del digestor de lodos era enviado hacia un filtro banda para su desaguado. En la actualidad esta unidad se encuentra fuera de operación también, por lo que los lodos son enviados con baja concentración de sólidos a disposición dentro de terrenos de la PTAR.

Diagrama de flujo de proceso

Para facilitar la comprensión de los procesos de tratamiento, más adelante, en la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo simplificado del proceso actual de tratamiento de agua y lodos.

DIAGRAMA DE FLUJO PTAR BICENTENARIO

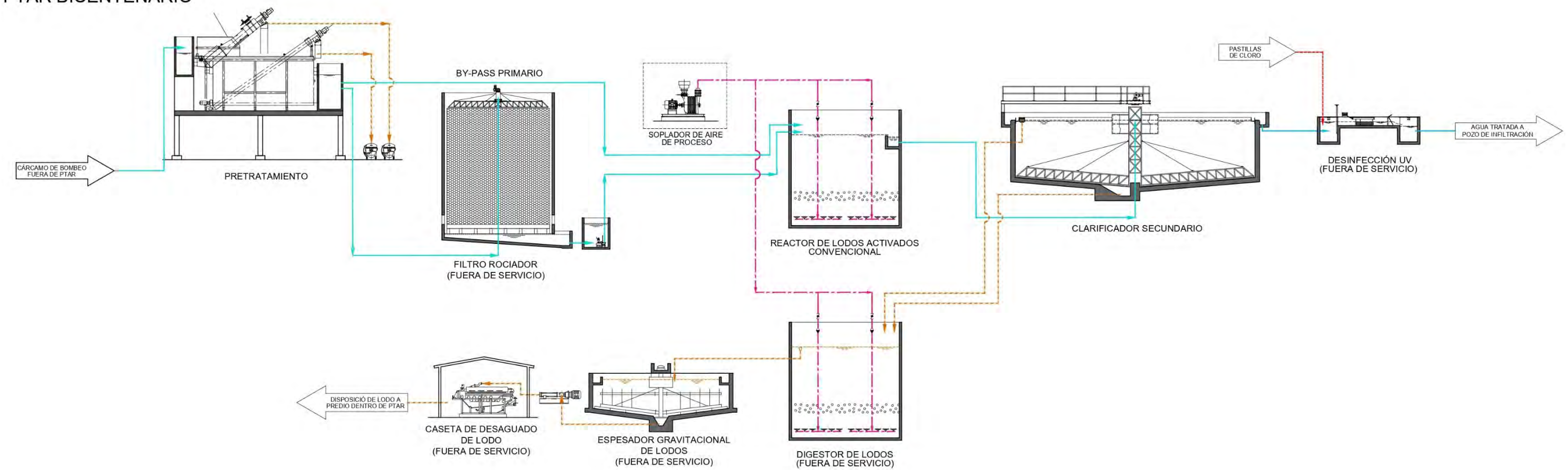


Figura 2 Diagrama de flujo de proceso actual PTAR Bicentenario

Descripción de las unidades de proceso

Como parte del trabajo de campo elaborado en este Estudio, se recopiló información sobre las características, dimensiones y condiciones de operación y mantenimiento de las unidades de proceso de la PTAR. En el caso de la PTAR Bicentenario es importante mencionar que presenta deterioro medio a severo en diversas zonas de las PTAR, algunas de ellas en efecto de bola nieve afectan a todas las zonas de proceso.

Una gran limitación de la PTAR es que solamente cuenta con un operador y un auxiliar por turno para toda la planta, además por lo observado el mantenimiento ha sido prácticamente inexistente lo cual ha ocasionado un severo deterioro de las instalaciones y equipos.

Tren de Tratamiento de Agua

Recepción de agua residual y agua de pipas

La PTAR se alimenta de dos fuentes principales de agua residual: la primera, proveniente del emisor principal, la cual ingresa directamente al pretratamiento elevado (Figura 4), sin necesidad de un cárcamo de agua cruda dentro de la misma planta. La segunda proveniente de pipas, la cual es alimentada a un cárcamo de recepción con cribado grueso dentro de la PTAR (Figura 5).

Dada la baja cobertura de drenaje de la localidad, el agua influente de pipas representa una proporción importante del total de agua residual ingresada a la PTAR. De acuerdo con información de la CAPA, se reciben hasta 50 pipas al día. Estos desechos pueden ser variados y en ocasiones presentan altas cargas orgánicas o bactericidas provenientes de los baños portátiles, que desequilibran el proceso biológico de la PTAR. La PTAR no cuenta con un protocolo de preanálisis y cribado del agua ingresada por pipas a la PTAR.

Pretratamiento

El agua cruda proveniente del emisor, así como el agua bombeada del cárcamo ingresa al equipo Ro5 en la plataforma de pretratamiento (Figura 6). Este equipo contaba originalmente con un sistema de criba rotatoria, desarenado horizontal y desengrasado. El equipo se encuentra fuera de servicio, por lo que funciona solo como un tanque de paso y acumulación de arenas, y grasas, las cuales se acumulan dentro de este.

El equipo Ro5 se presenta en todas las PTAR de la CAPA, y en todos presenta problemáticas similares. De acuerdo con información del personal de operación, el principal problema y que desencadena el mal funcionamiento de los restantes es la criba rotatoria, cuyos cepillos limpiadores y rejillas se deterioran muy rápido.

El agua efluente del equipo Ro5 se dirige hacia una caja de distribución (Figura 7). A esta caja de distribución ingresa también la recirculación de agua proveniente del cárcamo del filtro rociador. En el diseño original, la caja tenía la función de repartir el 50% del caudal hacia el filtro rociador el restante 50% hacia el reactor de lodos activados. Sin embargo, la tubería de conducción al cárcamo

se encuentra severamente deteriorada, por lo que toda el agua ingresa hacia el filtro rociador.

Filtro rociador

El agua ingresa al filtro rociador a través del brazo distribuidor en esta unidad (Figura 8), sin embargo, el motor que hace girar el brazo no funciona, además, presenta obstrucciones en algunas de las salidas, lo que provoca una pobre distribución del agua sobre el medio y su desempeño de remoción de materia orgánica. Este modo de operación propicia el crecimiento de moscas, las que se pueden encontrar en toda la PTAR. Las dimensiones de esta unidad se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1:
Dimensiones Filtro Rociador

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	1
Diámetro	m	20
Altura de medio	m	3
Altura recta total	m	5.2
Volumen útil del medio	m ³	942.5

Posterior al filtro rociador se encuentra un cárcamo de recirculación y elevación. Desde este se conduce una parte del efluente hacia la caja distribuidora del pretratamiento, como recirculación y otra parte se eleva hacia el reactor de lodos activados. La estación de bombeo de recirculación tiene dos bombas, pero sólo una está operable.

El conjunto de condiciones y fallas en la caja de distribución y filtro rociador provoca los siguientes inconvenientes de operación:

- + Debido al deterioro de la conducción de agua residual desde la plataforma de pretratamiento hacia los reactores de lodos activados, la única manera de alimentar agua hacia los reactores es el circuito que pasa a través del filtro rociador.
- + El brazo distribuidor del filtro rociador se encuentra fuera de operación, por lo que el agua residual que se alimenta no recibe tratamiento significativo en el medio plástico del filtro, debido a la sobrecarga hidráulica y orgánica que ocurre en la reducida sección mojada.

- + Del cárcamo de recirculación y elevación se bombea el agua hacia los reactores de lodos activados. Es decir, en actualidad la función del filtro rociador se limita a ser una unidad en la línea de conducción del agua.

Reactores de lodos activados

El reactor de lodos activados recibe el agua del filtro rociador, está modulado en dos unidades del mismo tamaño (Figura 9). El reactor es de tipo mezcla completa y cuenta con aireación difusa de burbuja fina. Un soplador de aire centrífugo alimenta aire para los dos reactores en operación. Actualmente la unidad presenta deterioro severo en las tuberías de conducción de aire y los pasillos de operación, presentándose incluso uno caído.

De la batería de sopladores existentes, solo uno se encuentra en funcionamiento y abastece de aire a ambos reactores. Al momento de la visita el proceso se encontraba desestabilizado, por lo que se observaba una apariencia turbia del agua dentro de los reactores y clarificadores, diferente al del proceso de lodos activados convencional. Las dimensiones de esta unidad se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2:
Dimensiones Reactores de Lodos Activados PTAR Bicentenario

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	2
Largo	m	37.9
Ancho	m	10.2
Tirante hidráulico	m	3.6
Volumen total	m ³	2,750

Clarificador secundario

El agua efluente del reactor de lodos activados pasa hacia un clarificador secundario (Figura 10). El clarificador separa los sólidos del agua que pasa clarificada hacia la desinfección. De esta unidad se realiza la recirculación de lodo hacia los reactores de lodos activados y la purga de lodo. Al momento

de la visita, se encontraba desestabilizada la PTAR, por lo que el agua en los clarificadores se observaba turbia (Figura 11). En la Tabla 3 se presentan las dimensiones de esta unidad.

Tabla 3:
Dimensiones Clarificador Secundario PTAR Bicentenario

Concepto	Unidad	Clarificador
Diámetro	m	28.3
Número de unidades	No.	1.0
Área	m ²	615
Tirante hidráulico, SWD	m	3.5
Volumen total	m ³	2,155

Desinfección

El agua clarificada pasa a un canal de desinfección (Figura 12). En un principio, la desinfección se realizaba por un sistema de luz UV, sin embargo, este dejó de funcionar. En su lugar la desinfección se realiza por hipoclorito de sodio o pastillas de cloro colocadas ocasionalmente en los vertedores del clarificador secundario.

El equipo UV se encuentra severamente deteriorado, lo que es visible pues se encuentra fuera del canal de desinfección. En general el área de desinfección aparenta poco mantenimiento, pues presenta lodo en las paredes y losa, de eventos pasados de arrastre de lodo o desestabilizaciones. Además, durante la visita se observaba la formación de espuma, en parte por la desestabilización del proceso que había experimentado la PTAR.

Disposición y aprovechamiento de agua tratada

El agua clarificada es descargada hacia el pozo de infiltración existente. Como se puede observar en la Figura 13, y dado el historial de fallas de equipos de la PTAR, las condiciones actuales del agua descargada al pozo propician que se colmate. El efluente no cuenta con medidores instalados, por lo que el caudal influente/efluente de la PTAR es estimado por otros medios. La PTAR cuenta con un tanque interno para el aprovechamiento de agua tratada en diferentes servicios.

Otros

Se presenta un problema severo de instalaciones eléctricas dentro de la PTAR. Una inundación de los registros eléctricos provocó el corto de diferentes equipos de proceso, limitando la operación de la PTAR. Dichos registros no han sido subsanados y es una de las razones por las que se observa tendido de cables superficiales por toda la PTAR.

Vistas del tren de tratamiento de agua

De la Figura 3 a la Figura 13 se presentan las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de agua de la PTAR.



Figura 3 Arreglo general de unidades de la PTAR Bicentenario de Tulum (CAPA, 2022)



Figura 4 Plataforma de pretratamiento y cárcamo de recepción de pipas



Figura 5 Cárcamo de recepción de pipas, zona de cribado y bombas de agua residual



Figura 6 Equipo de pretratamiento Ro 5



Figura 7 Caja de distribución en plataforma de pretratamiento



Figura 8 Filtro rociador con brazo distribuidor sin movimiento y cárcamo de elevación de agua de filtro rociador



Figura 9 Tanque de lodos activados con aeración difusa, con pasillo de operación caído.



Figura 10 Clarificación secundaria de puente fijo, cableado eléctrico inadecuado

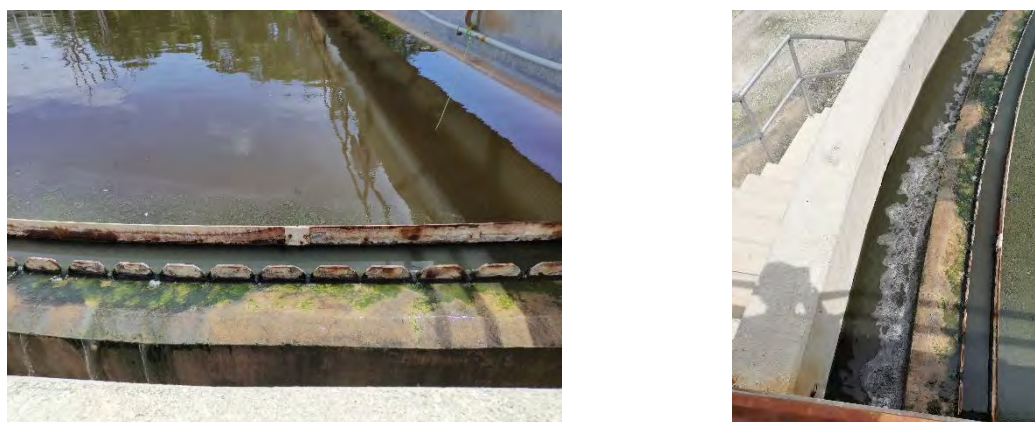


Figura 11 Vertedor effluente y mamparas de clarificador secundario



Figura 12 Estación de desinfección ultravioleta con deterioro severo, estructura de lámparas UV abandonadas



Figura 13 Pozo de infiltración de agua tratada

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua

Con el fin de verificar que las principales estructuras de proceso del tren de tratamiento de agua sean adecuadas en su diseño para tratar el agua y carga de contaminantes en el agua cruda, se efectuó la evaluación de los parámetros relevantes de cada una, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para tal efecto se utilizaron las dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior, además de la calidad influente a la PTAR establecida por CAPA, presentada a continuación:

- + Caudal medio de diseño 120 L/s
- + Calidad de agua cruda establecida por CAPA:
 - DQO, 1,118 mg/L
 - SST, 562 mg/L
 - DBO, 503 mg/L

En la Tabla 4 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de agua, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado con las dimensiones de las estructuras, en caso de no contar con algún dato de operación se asignó un valor promedio del rango típico. Cabe destacar que la siguiente evaluación considera el funcionamiento adecuado de las unidades, para comprobar su diseño y mejor escenario. Actualmente la PTAR opera alejado de estos valores.

Los rangos típicos indicados para el reactor y clarificador son para procesos de lodos activados con

mezcla completa.

Tabla 4:

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor
Caudal medio que ingresa al FR	L/s	No aplica	60
Carga orgánica volumétrica	kg/m ³ -d	1.6 a 4	2.77
Porcentaje de remoción de DBO en FR esperado	%	40 a 70%	50%
Reactor de lodos activados			
Caudal ingresado a Reactor de lodos	L/s		120
Carga orgánica influente a reactor de lodos activados	kg/d	-	3,912
Concentración de DBO influente al reactor	mg/L	No aplica	377
Concentración de SSTLM	mg/L	3,000 - 4,000	3,500
Fracción volátil		0.7-0.8	0.75
Relación F/M	kg/kg - d	0.2 a 0.6	0.54
Carga volumétrica	Kg DBO/m ³ - d	0.3 a 1.6	1.43
Tiempo hidráulico de retención total	horas	5 a 15	6.4
Tirante hidráulico	m	4.5 a 7.5	3.6
Clarificador Secundario			
Carga hidráulica superficial, Caudal medio	m ³ /m ² -d	16 a 28	16.5
Recirculación	%	25 a 100%	100%

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor
Carga de sólidos, Caudal medio	Kg/m ² - h	4 a 6	4.8
Tirante hidráulico	m	4 a 5	3.5

¹ Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

La carga orgánica influente al reactor de lodos activados a condición de diseño se calcula sumando las dos corrientes que ingresan al reactor de lodos activados.

1. La carga orgánica de la corriente proveniente de pretratamiento (60 L/s), con la calidad del agua cruda.
2. La carga orgánica de la corriente proveniente del filtro rociador (60 L/s), efluente de un proceso de tratamiento (filtro rociador, con eficiencia de remoción DBO del 50%), y como tal presentará menor concentración de contaminantes que el agua cruda influente a la PTAR.

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + A la condición de evaluada, el filtro rociador opera con una carga orgánica volumétrica adecuada, y dentro de los rangos recomendados. La remoción alcanzada por esta unidad puede variar, pero se estima que podrá encontrarse entre 40 y 70% de remoción de DBO.
- + A la condición evaluada, el reactor de lodos activados opera con valores de carga orgánica volumétrica y F/M (1.43 kg DBO/m³-d y 0.54 kg DBO/kg SSV d respectivamente) cercanos a los valores máximos recomendados (hasta 1.6 kg DBO/m³-d y 0.6 kg DBO/kg SSV d).
- + Este tipo de operación permite alcanzar los objetivos de remoción de DBO con volúmenes de reactor relativamente pequeños. La PTAR Bicentenario tiene la ventaja de la alta temperatura del agua residual, lo que acelera los procesos de los microorganismos.
- + Existe el riesgo de una desestabilización del proceso si se presenta una fuerte variación en calidad o caudal influente a la PTAR.
- + El bajo tirante hidráulico del reactor, de 3.6 m, representa un obstáculo para la transferencia de aire en la difusión de burbuja fina.
- + Para el correcto funcionamiento de la PTAR se requiere que el filtro rociador opere adecuadamente. Una baja eficiencia de remoción de contaminantes en esta unidad resultaría en una sobrecarga del reactor de lodos activados, sobre todo considerando que este opera, por diseño, con cargas orgánicas altas.
- + El clarificador secundario opera cercano a los rangos inferiores de carga hidráulica

recomendados, por lo que cuenta con suficiente capacidad para tratar el caudal de agua de diseño, e incluso con capacidad de sobra.

- + La PTAR no cuenta con una unidad de homogeneización y amortiguamiento del agua de pipas influente. Esto representa un obstáculo para el tratamiento de agua pues, de acuerdo con el personal de operación, esta agua tiene una alta carga orgánica y en ocasiones presenta bactericidas.
- + La PTAR no cuenta con infraestructura para la remoción de nitrógeno y el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Tren de Tratamiento de Lodos

Digestor aerobio de lodo

La purga de lodo secundario se conduce desde el cárcamo de recirculación de lodo (Figura 14) hacia el digestor aerobio de lodos (Figura 15), las natas secundarias del clarificador se dirigen a esta unidad también. Al momento de la visita, el digestor se encontraba fuera de operación debido a fallas con el soplador que suministra aire a esta unidad (Figura 19). Las dimensiones del digestor se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5:
Dimensiones Digestor de Lodos PTAR Bicentenario

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	1.0
Largo	m	24.25
Ancho	m	12.25
Tirante hidráulico	m	3.5
Volumen total	m ³	1,040

Espesado y desaguado de lodo

El lodo digerido es alimentado a una unidad de espesado gravitacional (Figura 16). Desde esta unidad se recircula una parte del lodo espesado de vuelta al digestor y otra parte es retirada para mandarse hacia el desaguado de lodo. De acuerdo con el diseño, el lodo en el digestor se mantiene a una concentración constante mediante este circuito de recirculación de lodo entre el digestor y el espesador. Al momento de la visita esta unidad se encontraba fuera de operación.

El lodo digerido es mandado hacia desaguado por medio de un filtro banda (Figura 17). Se cuenta también con un equipo de preparador de polímero exclusivo para alimentar esta unidad. Ambos equipos se encuentran en el edificio de manejo de lodos, sobre el digestor de lodos (Figura 18). Al momento de la visita, esta unidad se encontraba fuera de operación. Con todas las unidades del tren de lodo fuera de operación al momento de la visita, el lodo secundario era purgado directamente dentro de predios de la PTAR sin efectuar espesado o desaguado.

Vistas del tren de tratamiento de lodo

De la Figura 14 a la Figura 19 se presentan las diversas unidades del tren de lodos.



Figura 14 Cárcamo de recirculación de lodos secundarios



Figura 15 Digestor aerobio de lodos



Figura 16 Espesador de lodos



Figura 17 Equipo preparador de polímero y filtro banda fuera de operación



Figura 18 Edificio de manejo de lodos



Figura 19 Caseta de sopladores para proceso de agua y de digestión de lodos.

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de lodo

Con el fin de verificar que las principales estructuras y equipos de proceso del tren de tratamiento de lodo sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño más relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para esta evaluación se consideraron las siguientes premisas de cálculo:

- + Dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior
- + Producción de lodos, se estimó con base en la fórmula simplificada de la Agencia de

Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) con los datos de caudal medio de diseño y calidad de agua cruda promedio del histórico (SST y DBO), mismos que se utilizaron para la evaluación del tren de agua (US EPA, 1993).

- + Para determinar el volumen de lodos se utilizaron las concentraciones típicas esperadas en la purga de lodo secundario.
- + De manera conservadora, se consideró que los equipos mecánicos de desaguado operan con un rango común de operación, 16 horas al día, 7 días a la semana.

En la Tabla 6 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de lodo, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR con las dimensiones de las estructuras y capacidades de equipos. En caso de no contar con algún dato de operación se consideró un valor promedio del rango típico.

Tabla 6:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Bicentenario
Producción de lodo			
Producción de lodo esperada	kg SST /día	No aplica	4,970
Concentración		0.5 a 1.5%	0.70%
Flujo volumétrico	m ³ /día	No aplica	710
Digestión Aerobia de lodo			
Concentración de lodo en tanque	%		2%
Volumen de lodo alimentado equivalente	m ³ /día		247.2
Tiempo de retención hidráulico (edad de lodo, ≈28°C)	días	18 a 20	4.2
Carga de sólidos volátiles	kgSSV/m ³ -d	1.6 a 4.8	3.6

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Bicentenario
Destrucción esperada		38 a 50%	10%
Masa de lodo digerido estimada	kg SST /día		4,560
Desaguado de Lodo			
Días de operación por semana			7
Horas de operación por día			16
Ancho de banda	m	1 a 3	1.9
Carga de sólidos (por metro)	kg/h	250 a 410	151
Carga hidráulica (por metro)	L/min	150 a 340	135.5
Porcentaje de captura		90 a 98%	95%
Concentración de lodo espesado esperada		12 a 22%	18.0%
Volumen de lodo desaguado	m ³ /día		26.2
Masa de lodo desaguado estimada	kg SST/día		4,370

¹ Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + Debido a la alta carga orgánica influente, la producción de lodo en esta PTAR es mayor que otras PTAR de la zona con caudales de tratamiento similares.
- + El esquema actual de operación, con el espesado posterior a la digestión, es poco común, y requiere de un esfuerzo operativo mayor para operarlo adecuadamente. Además, con un espesador gravitacional, la literatura (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014) especifica una concentración de sólidos alcanzable entre 2 y 3%, relativamente baja en comparación a otras tecnologías de espesado.
- + Para la evaluación del digestor se considera que se logra mantener una concentración de 2%

de sólidos en el tanque, con lo que el tiempo de retención de esta unidad resulta de 4.2 días, mucho menor que el rango recomendado de 18 a 20 días.

- + Debido a la baja edad de lodos en el digestor aerobio, se espera baja destrucción de SSV, de alrededor de 10%.
- + La eficiencia de la digestión depende fuertemente del desempeño del espesado de lodos, a mayor concentración de sólidos, se alcanza mayor edad de lodos y mayor destrucción de SSV. Sin embargo, en el caso del digestor de la PTAR Bicentenario, el volumen es insuficiente para proporcionar la edad de lodo recomendada, aun espesando dentro de los límites convencionales.
- + Como ejercicio demostrativo, con una concentración de 3.5% de sólidos en el lodo alimentado al digestor, el volumen necesario para lograr una edad de lodos de 20 días en el digestor sería de 2,850 m³. Esto contrasta contra el volumen actual de 1,040 m³.
- + A la condición de diseño, y bajo la premisa de operación de 7 días a la semana por 16 horas, el filtro banda opera con cargas de sólidos adecuadas para su correcto funcionamiento e incluso por abajo del rango recomendado. Esto indica que podría operar por menos horas o menos días.

Estado de conservación y operación de las instalaciones PTAR Bicentenario de Tulum

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de agua de la PTAR Bicentenario, evaluadas con base en el cumplimiento de la NOM-001-2021 para suelo cárstico en DQO, SST, NT y PT con el promedio histórico de calidad de agua, se clasifican como **“Regular”**. Lo anterior debido a que, de acuerdo con la información proporcionada por la CAPA, cumplen con dos de los cuatro parámetros.

De acuerdo con los resultados del muestreo efectuado en el presente Estudio, las condiciones de operación del tren de tratamiento de agua clasifican como **“Malas”**.

En la sección **Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada**, se presenta la evaluación de dicha información.

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de lodos, determinadas con base en las condiciones operativas y de desempeño de las operaciones de espesado, digestión y desaguado observadas en la visita, se clasifican como **“Muy Malas”**. El tren de lodos está fuera de operación en su totalidad y los lodos sin digerir, ni espesar, ni desaguar son depositados en terrenos de la PTAR.

En términos generales las condiciones de mantenimiento de los trenes de tratamiento de agua y de lodos en base a equipos, tuberías e inclusive obra civil se consideran **“Malas”**.

Tulum, junto con Playa del Carmen, experimenta un crecimiento poblacional y de dinámicas urbanas muy acelerado, y de los mayores a nivel nacional. Consecuentemente, se prevé en los próximos años un importante crecimiento de la demanda de agua, servicios de drenaje y generación de aguas residuales. Se estima que antes de 20 años se duplique la población

La PTAR Bicentenario de Tulum empezó a operar en el año 2010 y cuenta con un proyecto para incrementar la capacidad a 240 L/s. Sin embargo, dadas las necesidades de la PTAR, así como los posibles escenarios futuros, se debe evaluar un plan de acción que pueda satisfacer todas las necesidades de saneamiento de Tulum. Entre estos se encuentra la baja cobertura de alcantarillado, cercana al 45% según CAPA. Esto se refleja en el caudal recibido, de entre 55-70 L/s, muy inferior al generado por una población de este tamaño.

En los párrafos subsecuentes se describe lo observado en la visita técnica efectuada a la PTAR.

- + Se presentan muchas áreas de la PTAR con deterioro medio o severo. Las problemáticas de proceso, mantenimiento y de operación se acumulan entre sí, de manera que se vuelve complejo arreglar un solo aspecto por vez.
- + No existe medición de influente ni de efluente, estos valores son estimados por el personal operativo mediante horas de operación de equipos y otros métodos empíricos.
- + No se cuenta con un historial de calidad de agua histórico ni mediciones de caudal formales

por un largo tiempo.

- + La PTAR cuenta con poca fuerza de trabajo, se opera con un operador base y un auxiliar, lo que es insuficiente para una planta con estas características. Esto impacta en la falta de mantenimiento y uso de diferentes instalaciones dentro de la planta.
- + No hay una planta de energía de emergencia.
- + El área de laboratorio no es utilizada y almacena actualmente archivo muerto. Consecuentemente, no se tienen registros de parámetros operativos relevantes para el seguimiento de proceso.
- + 3 de los 4 sopladores que alimentan a los reactores de lodos activados se encuentran fuera de servicio, por lo que no se cuenta con capacidad suficiente para cumplir con la condición de diseño.
- + La calidad de agua tratada efluente era visiblemente mala, turbia y con mal olor.
- + La desinfección que ha sido objeto de dos cambios: de cloro gas a ultravioleta, y de ultravioleta a dosificación de hipoclorito de calcio, está en condiciones precarias y debe ser mejorada significativamente. La mala calidad del efluente es un serio obstáculo para lograr una desinfección efectiva.
- + Como un esfuerzo para lograr la desinfección, se está aplicando solución de hipoclorito, sin embargo, se requiere mejorar significativamente la calidad del efluente para lograr una desinfección adecuada. Además, se carece de tanque de contacto para lograr el tiempo requerido para la desinfección química.
- + Se observa deterioro estructural severo y riesgo de falla con fisuras y acero de refuerzo expuesto en la caseta de desaguado de lodos. Esta área está expuesta a diferentes compuestos volátiles debido a la digestión y desaguado, por lo que es susceptible a deterioros más acelerados que otras zonas de la PTAR.
- + Las instalaciones hidráulicas y civiles de los pozos de infiltración de agua se observan con severo deterioro y carentes de registros, protección y de adecuado mantenimiento; además carecen de medición de caudal en cada pozo, la medición se efectúa a la salida del tanque de contacto de cloro.

Con respecto al equipamiento mecánico se observa lo que a continuación se describe:

- + Se presenta un problema severo de instalaciones eléctricas dentro de la PTAR. Una inundación de los registros eléctricos provocó el corto de diferentes equipos de proceso, limitando la operación de la PTAR. Dichos registros no han sido subsanados y es una de las razones por las que se observa tendido de cables superficiales por toda la PTAR.
- + El equipo de pretratamiento (cribado, desengrasado y desarenado) se encontraba fuera de servicio por falta de mantenimiento.
- + Filtro rociador con brazo distribuidor estático, reduciendo la eficiencia de remoción de este proceso.

- + La mayoría de los sopladores para proceso y digestión se encuentran descompuestos, y solo uno se mantiene en operación para el proceso de lodos activados.
- + Las rastras, tornamesas e internos del clarificador secundario registran condiciones moderadas de deterioro.
- + Por problemas de mantenimiento de equipos la totalidad del tren de lodos: espesamiento, digestión y desaguado, estaba fuera de operación.
- + La estación de cloración ha sido objeto de dos modificaciones de cloro gas a ultravioleta y de ultravioleta a aplicación de solución de hipoclorito, en forma precaria. Esta última instalación tiene características de provisional, además carece de un tanque formal de contacto de cloro.

El área de saneamiento de la CAPA elaboró en mayo de este 2022 un plan de ampliación y rehabilitación para esta PTAR Bicentenario de Tulum que deberá adecuarse tomando en cuenta los requerimientos de la NOM-001- SEMARNAT 2021 para cuerpo receptor suelo cárstico. Es de esperarse que el presente trabajo contribuya a este fin.

En el Anexo 1 (Ficha de la PTAR) se presenta la descripción detallada de las características y condiciones actuales de operación y mantenimiento de las estructuras y equipos del tren de agua y lodos.

Análisis de calidad del agua cruda

Calidad de agua cruda, histórica

A continuación, se presentan los datos de calidad de agua cruda proporcionados en la Base de Datos de la CAPA para la PTAR Bicentenario. No se proporcionaron datos de varios muestreos, únicamente los valores presentados en la siguiente tabla.

Tabla 7:
Calidad de agua residual cruda (mg/L)

SST	DBO	DQO	Nitrógeno Total	Fósforo Total
562	--	1,118	75	7.5

Calidad de agua cruda, de este Estudio

Del 3 al 4 de octubre se efectuó un muestreo compuesto de 24 horas tanto en el influente y efluente de la PTAR Bicentenario y adicionalmente del 22 al 23 de noviembre se realizó otro en el influente, este se efectuó con seis muestras simples, a cada una de estas se les realizaron los siguientes análisis de campo:

- + pH
- + Temperatura del agua
- + Cloro residual libre (efluente)
- + Los parámetros analizados en el laboratorio fueron los siguientes:
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)

- + Escherichia coli (efluente)
- + Toxicidad Vibrio fischeri (efluente)
- + Huevos de helminto
- + Color verdadero (UV-Vis) a 436, 525 y 620 nm

Las actividades de colecta, preservación y análisis de las muestras fueron realizadas por personal de Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis (Intertek + ABC Analitic), éste cuenta con la acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA) en la rama de agua número AG-096-029/11 para su laboratorio ubicado en la ciudad de México y AG-096-029/11_S1 para el laboratorio de Mérida, que es donde se realizarán los análisis.

En todos los casos, la preservación y el almacenamiento de las muestras se efectuaron de acuerdo con los lineamientos que establece la normatividad mexicana. Las muestras colectadas fueron preservadas con hielo a una temperatura de 4°C con la intención de que no se degradaran, y fueron transportadas en una hielera al laboratorio correspondiente para su análisis.

El transporte se hizo con sumo cuidado, de tal forma que se evitaron los derrames y/o contaminación de muestras debido a rupturas de frascos o cualquier otro accidente.

Los diferentes frascos que integran las muestras se preservaron con los reactivos señalados en la normatividad.

En el Anexo 3 se presentan los resultados completos del laboratorio del influente y efluente de la PTAR Bicentenario. En la Figura 20 se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Bicentenario.

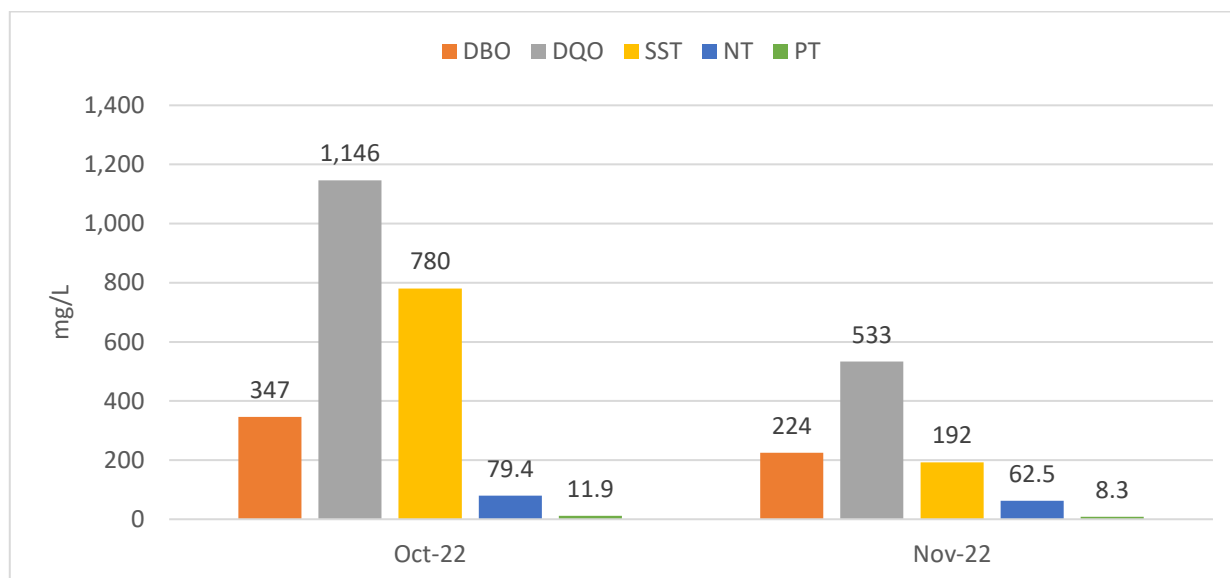


Figura 20 Caracterización del agua cruda (oct-nov-2022)

Como se observa en la figura anterior, los valores de DBO, DQO y SST obtenidos en los dos muestreos son muy distintos entre sí. Con la finalidad de conocer la relación de contaminantes, se realizaron los cálculos que a continuación se presentan en la siguiente tabla, los cuales fueron determinados con el valor promedio de los resultados obtenidos en este Estudio.

Tabla 8:
Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente

Relación	Valor Promedio Estudio 2022	Rango típico en Aguas Residuales Municipales ¹
DBO5/ DQO	0.34	0.45 – 0.55
SST/ DBO	1.70	0.80 – 1.20
NTK/ DBO	0.25	0.10 – 0.20
Fósforo/ DBO	0.04	0.02

¹ (US EPA, 1993)

Casi todas las relaciones de calidad influente en las determinaciones realizadas en este estudio se encuentran fuera de los rangos típicos encontrados en el agua residual, además de presentarse

valores muy distintos entre ambos muestreos:

- + En el muestreo de octubre, contrastan el valor bajo de la DBO y el valor alto de SST, esto hace que las relaciones de DBO5/DQO y SST/DBO estas desproporcionadas y se alejen de los rangos típicos, esto puede deberse a posibles aportaciones de agua residual de origen no doméstico que llegan a través de las pipas.
- + En el muestro de noviembre, se tuvieron valores de DBO, DQO y SST más convencionales, lo que hace que las relaciones DBO5/DQO y SST y DBO estén dentro o muy cerca de los rangos típicos para aguas municipales.
- + La relación DBO5/ DQO es un indicador de la tratabilidad del agua por medios biológicos, en general valores bajos se relacionan con una mayor dificultad de tratamiento, si la relación es menor a 0.3 es un indicador de la presencia de compuestos tóxicos en el agua residual que dificultan su tratamiento biológico (Metcalf & Eddy, 2003), en el muestreo de octubre la relación estuvo en el límite lo que pudiera ocasionar dificultades en el proceso.
- + En ambos muestreos se presentaron concentraciones altas de nitrógeno y fósforo en relación con la DBO, esto probablemente se deba a la sedimentación de la DBO particulada en el sistema de alcantarillado.

Es importante efectuar una campaña de monitoreo del influente de esta PTAR, analizando por separado lo que llega a través de las pipas y lo que llega a través del alcantarillado.

Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada

En las siguientes figuras y tablas se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada del histórico de datos proporcionados por CAPA y de los obtenidos en el presente Estudio, en estas se presentan los límites permisibles (LP) establecidos en la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelo cárstico.

Tanto los datos de calidad de agua cruda y tratada proporcionados por el organismo operador se encuentran en el apartado Bases de Datos.

Calidad de agua tratada, histórica

Se proporcionaron datos de 12 muestreos de tipo compuesto efectuados en el efluente durante el periodo del año 2020 al 2021.

Los parámetros incluidos en las bases de datos de CAPA son los siguientes:

- + Caudal promedio
- + Temperatura
- + pH: Potencial de hidrógeno

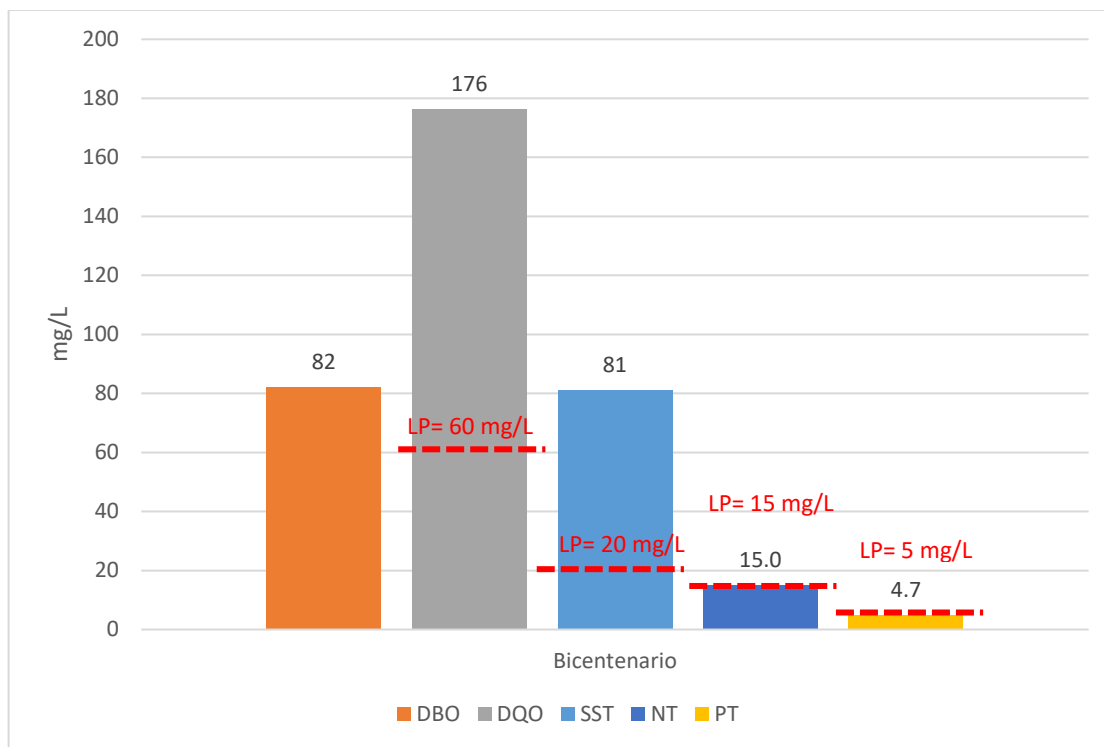
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos sedimentables
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO_2)
- + Nitrógeno de nitratos (NO_3)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Nitrógeno amoniacal (N-NH_3)
- + Fósforo total (PT)
- + Coliformes fecales
- + Arsénico
- + Cadmio
- + Cianuro
- + Cobre
- + Cromo
- + Mercurio
- + Níquel
- + Plomo
- + Zinc

En la siguiente tabla se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros en el agua tratada de la PTAR Bicentenario.

Tabla 9:
Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)

Concepto	G & A mg/L	SST mg/L	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	NT mg/L	NTK mg/L	PT mg/L	Huevos de helminto (huevos/L)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
No. De datos	10	12	10	8	10	10	10	10	10
Mínimo	5	49	56	121	6.50	6.40	1.20	0.2	3
1° cuartil	5	81	78	162	13.31	13.19	2.75	0.2	3
Promedio	8	81	82	176	14.96	14.85	4.74	0.2	3
Mediana	10	85	89	182	15.60	15.50	4.65	0.2	3
3° cuartil	10	89	91	197	17.12	17.00	5.98	0.2	3
Máximo	10	96	98	225	21.10	21.00	10.30	0.2	3

A manera de resumen en la Figura 21 se presentan los valores promedio de los principales parámetros del agua tratada de la PTAR Bicentenario, en esta se indican los límites permisibles (LP) para el promedio mensual en la NOM-001-2021.



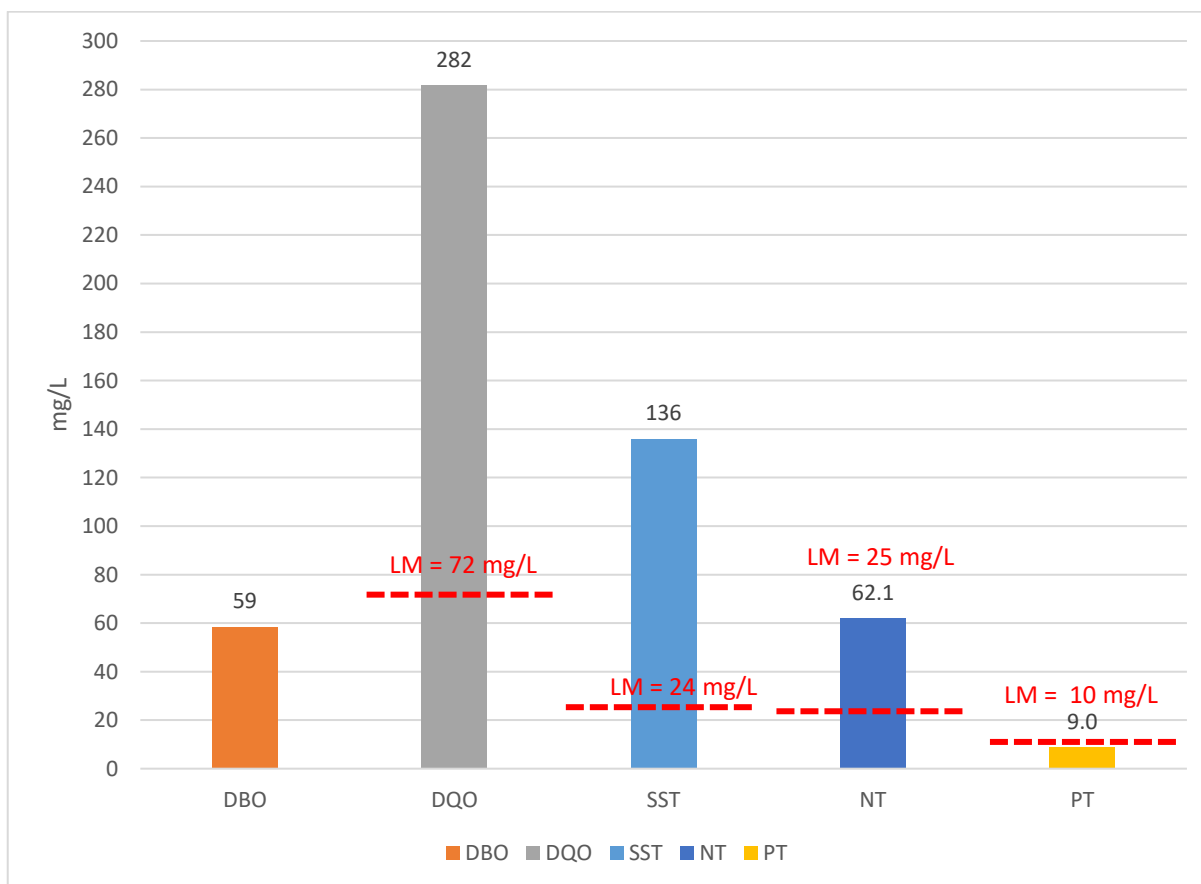
LP = Límite permisible

Figura 21 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)

Calidad de agua tratada, de este Estudio

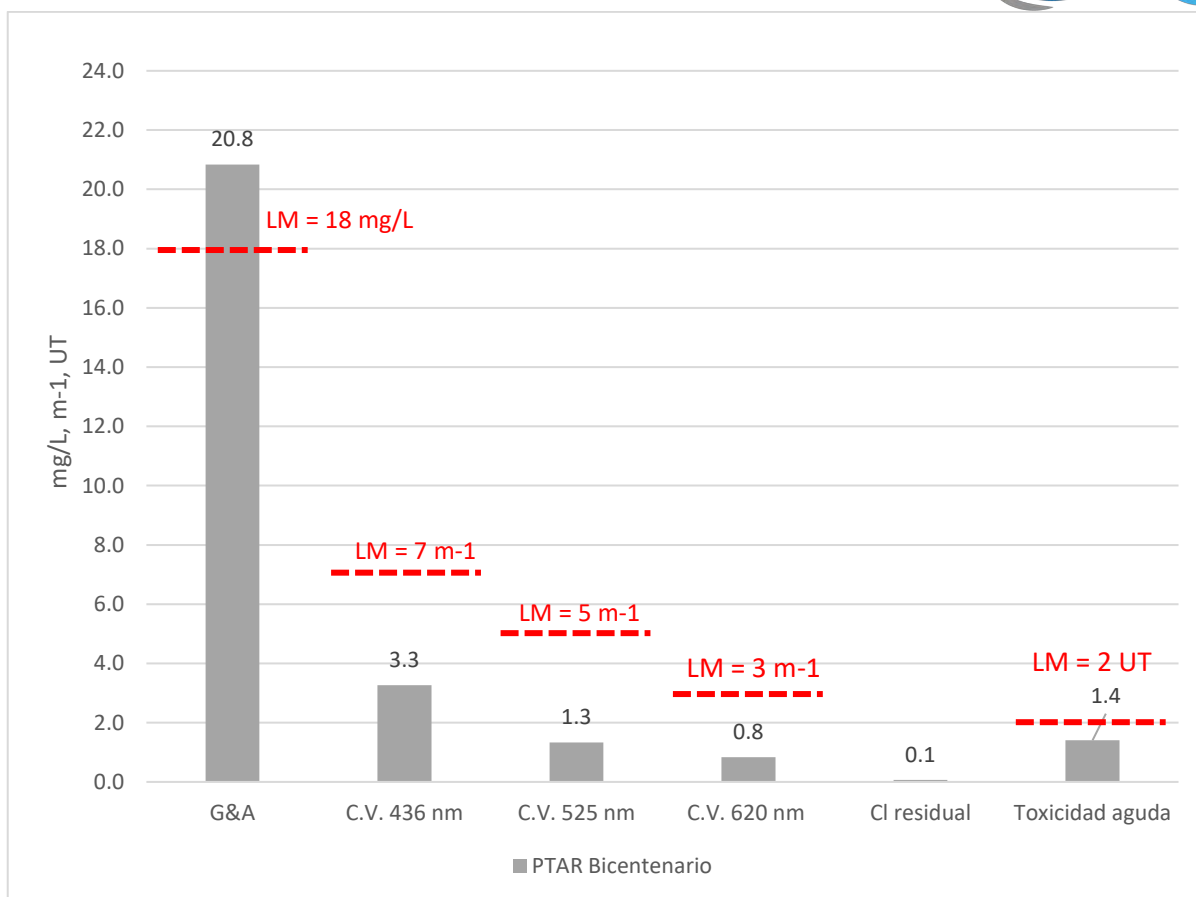


En la siguientes figuras y tabla se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada de la PTAR Bicentenario, en estas se indican los límites permisibles para el promedio diario en la NOM-001-2021.



LP = Límite permisible

Figura 22 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 23 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)

Tabla 10:
Caracterización del agua tratada de este Estudio (*E. coli* y Huevos de helminto)

Parámetro	Unidades	PTAR Bicentenario	Límite permisible NOM-001-2021
E.coli	NMP/100 mL	>2'400,000	100
Huevos de helminto	HH/L	<0.2	1

Con la información histórica de calidad de agua tratada proporcionada por CAPA y los resultados de los análisis efectuados se efectuó el análisis del cumplimiento de los principales parámetros de calidad del agua con respecto a la NOM-001-SEMARNAT-2021. Para los valores de los datos históricos se utilizó el límite permisible promedio mensual y para los resultados de los muestreos efectuados en este Estudio se utilizó el límite permisible del valor promedio diario.

Dada la divergencia encontrada en algunos parámetros entre los resultados de este Estudio y los rangos de valores del histórico de la base de datos (2020-2021) proporcionada por la CAPA, no se considera adecuado promediar el resultado del valor obtenido en este Estudio con los valores históricos, por lo que la evaluación se efectúa de manera separada para los dos grupos de datos.

Tabla 11:
Cumplimiento del agua tratada

Parámetro	Valor promedio histórico (2020-2021) (mg/L)	Valor Estudio 2022 (mg/L)	Límite permisible NOM-001-2021	Cumple
SST	81 -	- 136	PM = 20 (mg/L) PD = 24 (mg/L)	NO NO
DQO	176 -	- 282	PM = 60 (mg/L) PD = 72 (mg/L)	NO NO
Nitrógeno total	15.0 -	- 62.1	PM = 15 (mg/L) PD = 25 (mg/L)	SI NO
Fósforo total	4.7 -	- 9.0	PM = 5 (mg/L) PD = 10 (mg/L)	SI NO

PM = promedio mensual, PD = promedio diario.

Con respecto al color verdadero en las tres longitudes de onda, huevos de helminto y toxicidad aguda se obtuvieron valores dentro del límite permisible, la concentración de grasas y aceites y *E. Coli* estuvieron por encima del límite permisible.

Parámetros de operación del reactor de lodos activados

Como parte de los trabajos de caracterización del agua cruda y tratada de la PTAR, también se incluyó la medición de los parámetros de operación del reactor de lodos activados, oxígeno disuelto (OD) y sólidos sedimentables (SS). Los datos obtenidos en campo (Figura 24) se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12:
Oxígeno disuelto y Sólidos Sedimentables en reactor de lodos activados de la PTAR

Equipo	Valor
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.35
Sólidos Sedimentables (mL/L)	440

Asignando un valor típico de índice volumétrico de 120 mL/g, los SS obtenidos en el reactor de la PTAR Bicentenario equivalen a una concentración de SSLM de 3.67 g/L. El rango típico para este tipo de reactores es de 3 a 4 g/L (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014), por lo que opera a una concentración adecuada.

El rango típico de operación de OD en reactores de lodos activados es de 1 a 3 mg/L (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014), por lo cual el valor obtenido en la PTAR Bicentenario se considera insuficiente, esto puede ser consecuencia de los sopladores que están fuera de servicio.



Figura 24 Análisis en campo PTAR Bicentenario

Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua

Como parte de las actividades realizadas en campo, se registraron las coordenadas de los pozos de infiltración de cada PTAR, utilizando un equipo GPS map 60Cx marca Garmin.

En la Tabla 13 se presentan las coordenadas de localización de los pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR Bicentenario. Posteriormente, en la Figura 25 se presentan fotografías correspondientes al levantamiento de las coordenadas con GPS y de los registros o brocales de los pozos de infiltración.

Tabla 13:
Coordenada de pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR

No. de pozo	Coordenadas Latitud	Coordenadas Longitud
1	20.23898°	87.48579°



Figura 25 Pozos de infiltración PTAR Bicentenario

Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR

Pendiente de incorporar, no se ha recibido la información por parte de CAPA.

Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) de cada planta

De acuerdo con la información proporcionada por la CAPA, el costo total de O & M de la PTAR Bicentenario en el año 2021 fue de 4.50 millones de pesos (mdp's), desagregado de la siguiente forma:

- + Costo de operación: 2.70 mdp's
- + Costo de mantenimiento: 1.80 mdp's
- +

Considerando que el caudal medio de agua tratada en el año 2021 fue de 55 L/s, que representan un volumen anual de 1,734,480 m³, el costo unitario de O & M es de 2.59 \$/m³ de agua tratada.

Con relación a la energía eléctrica consumida en el proceso de tratamiento, la información proporcionada indica los siguientes valores anuales:

- + Consumo anual de energía: 644,472 kWh
- + Costo anual: \$ 2,092,756

A partir de los valores previos se calcularon los siguientes indicadores:

- + Costo unitario de la energía. 3.25 \$/kWh
- + Consumo unitario de energía: 0.37 kWh/m³
- + Costo energía respecto al costo O & M: 47 %

En la información del costo de O & M, así como la de consumo y costo de energía eléctrica, se debe tener en consideración lo siguiente respecto a la PTAR Bicentenario:

- + La calidad del agua tratada es "Regular".
- + El digestor de lodos está fuera de operación, por lo que no tiene este consumo muy

significativo de energía.

- + Las etapas de espesado y desaguado de lodo no operan, por lo que, además de la energía eléctrica no consumida, tampoco se tiene el costo por consumo de polímero.
- + El lodo sin estabilizar se dispone de manera líquida en el terreno, eliminando el costo de acarreo y disposición de lodo desaguado.
- + La planta carece del personal suficiente y requerido para una adecuada operación y mantenimiento.



Estimación de los costos de operación y mantenimiento



A efecto de comparar el costo de operación reportado por la CAPA contra un costo de referencia se procedió a estimar los costos anuales de un grupo de insumos relevantes:

- + Energía eléctrica,
- + Cloro para desinfección,
- + Polímero para espesado y/o desaguado de lodo,
- + Acarreo de lodo desaguado, y
- + Análisis de laboratorio de agua tratada y lodo para cumplimiento normativo y control de proceso
- + Personal de O & M

Para lo anterior, con base en un caudal medio de 55 L/s y la información de calidad de agua cruda y tratada proporcionada por el Organismo Operador se efectuó un balance de materia simplificado para establecer la masa de DBO removida, la generación de lodos en el proceso de tratamiento, la remoción de sólidos suspendidos volátiles en el proceso de digestión y la masa de lodo desaguado a disposición.

Una vez definidos en el balance de materia los valores requeridos, se procedió a aplicar los factores de dosificación o consumo de los principales insumos (energía eléctrica, cloro polímero para espesado y/o polímero para desaguado) con base en la masa de lodo generada y las prácticas adecuadas de operación. En el caso de los análisis de laboratorio de agua tratada y lodos, a partir de los requerimientos normativos.

En la Tabla 14 se presentan las consideraciones aplicadas para establecer el consumo de los insumos arriba indicados, así como el costo unitario asignado:

Tabla 14:
Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Energía eléctrica	Caudal medio de agua tratada y concentración promedio de DBO	1.76 kWh/kgDBO	2.50 \$/kWh

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Cloro	Caudal medio de agua tratada	5.0 mg/L	20 \$/kg
Polímero para espesado	Producción de lodo con base en caudal medio y concentración promedio de DBO y SST	No Aplica, es espesador gravitacional	150 \$/kg
Polímero para desaguado	Fracción volátil del 75 % del lodo producido y remoción del 40 % de SSV en digestor	7.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Acarreo lodo desaguado, base húmeda	Lodo desaguado al 20 % de sólidos Masa de lodo en base seca/0.20	Ton de lodo en base húmeda	150 \$/ton
Análisis laboratorio Agua tratada	NOM-001 población > 50 mil habitantes	2 muestreos/mes	8,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Lodo / biosólidos	NOM-004 hasta 1,500 ton/año (base seca);	1 muestreo/año	10,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Control de proceso	---	1 lote por mes	6,000 \$/mes

El costo del mantenimiento preventivo de la PTAR y los consumibles asociados a esa actividad se estimó aplicando el criterio de destinar un importe anual equivalente al 0.85 % del costo de inversión de la planta con sus actuales características. El costo de la planta se estableció a partir de un costo base de 750 mil pesos por litro – segundo de capacidad media instalada.

Para establecer el costo del personal de operación y mantenimiento se considera una plantilla “tipo” de doce personas, misma que se desagrega en las siguientes plazas: 1 Jefe de planta, 2 Supervisores de operación/mantenimiento, 5 operadores y 4 auxiliares de operación o mantenimiento.

Los sueldos considerados para establecer este rubro de costo están en el rango de 28,000 pesos mensuales para el Jefe de planta y de 12,000 pesos por mes para el auxiliar de

operación, los sueldos del resto del personal están comprendidos dentro de este rango.



Los sueldos nominales se afectaron por un factor de 1.50 para incorporar el costo de las diversas prestaciones y seguridad social del personal. De esta forma se determinó un costo total mensual de \$ 306, 000 por concepto de personal.

El factor unitario de consumo de energía eléctrica asignado permite establecer, además de la energía consumida por la planta, otros dos indicadores que en la PTAR Bicentenario tienen el siguiente valor:

- + Consumo unitario de energía: 0.86 kWh/m³
- + Potencia media de operación: 428 kilowatts

En la **Tabla 15** se presentan los consumos e importes anuales de los rubros de costo establecidos, así como el costo unitario de cada rubro, al dividir su importe anual entre el volumen de agua tratada. Posteriormente, en la Figura 26 se presenta de manera gráfica el costo unitario desagregado por insumo.

Tabla 15:
Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M

Insumo	Consumo anual	Importe anual \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Energía eléctrica	1,499,174	3,747,934	2.16
Cloro	8,672	173,448	0.10
Polímero para espesado	0	0	0.00
Polímero para desaguado	5,173	775,906	0.45
Acarreo lodo desaguado	3,233	484,941	0.28
Análisis laboratorio		274,000	0.16
Mantenimiento		765,000	0.44

Insumo	Consumo anual	Importe anual \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Personal de O & M		2,754,000	1.59
Total		8,975,229	5.17

Energía eléctrica consumo anual expresado en kWh; cloro, polímero para espesado y polímero para desaguado, en kg; acarreo de lodo, en toneladas.

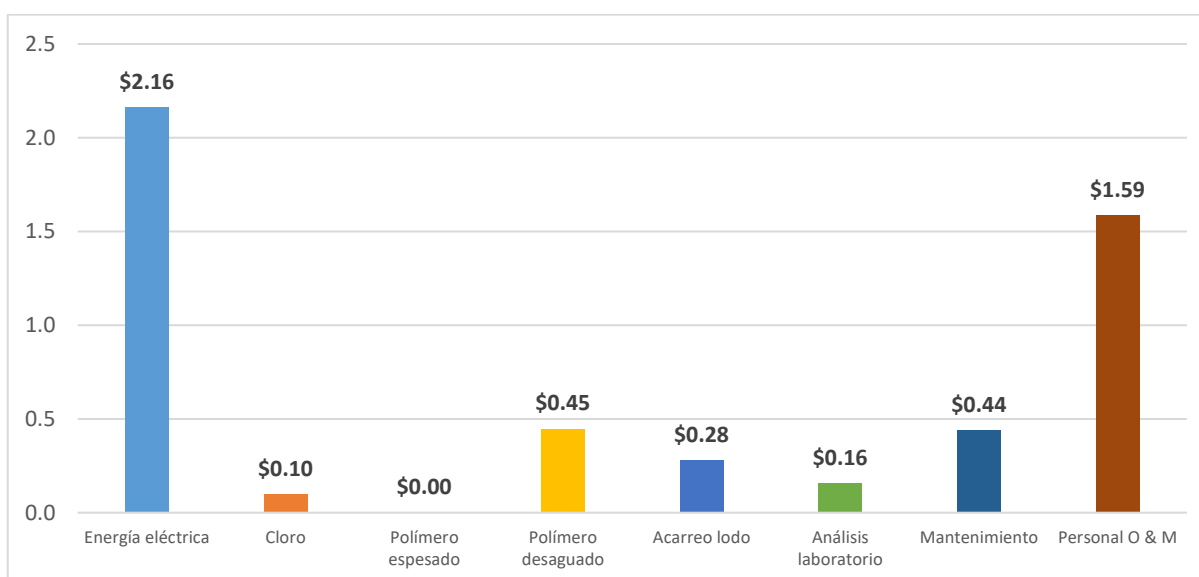


Figura 26 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m³

El importe anual de operación y mantenimiento estimado en esta sección es de 8.98 millones de pesos, con un costo unitario de O & M de 5.17 pesos por metro cúbico de agua tratada.

El alto costo unitario del agua tratada se debe a la elevada carga orgánica influente a la PTAR, con DBO promedio de 503 mg/l; como marco de referencia, el resto de las plantas > 100 lps tienen en promedio DBO de 322 mg/l, con promedio mínimo y máximo de 216 mg/l y 469 mg/L, respectivamente.

Lo anterior se traduce en elevado consumo de energía eléctrica en el tren de agua, así como mayor generación de lodo mismo que se debe estabilizar, desaguar y disponer, con el

consiguiente sobrecosto en energía eléctrica, polímero y acarreo.



Asimismo, otra situación que incide en incrementar el costo unitario del agua tratada es que la PTAR solo trató un caudal medio de 55 L/s, por lo que los costos fijos de operación y mantenimiento se prorratan en un menor volumen de agua.

Al comparar el importe anual de O & M aquí estimado con el reportado por la CAPA, de 4.5 millones de pesos, se tiene una excedencia de ≈ 4.5 mdp's en el costo estimado con respecto al reportado, lo que representa un 100 %.

La amplia diferencia entre el costo estimado y el reportado por la CAPA, no obstante, la imprecisión propia del método aplicado, es indicativa de la fuerte insuficiencia de recursos humanos, materiales y económicos con que opera la PTAR Bicentenario. Esta situación desfavorable se confirma con lo observado en la visita de campo, en las condiciones actuales de operación del tren de agua y lodos, así como en los resultados de calidad de agua tratada.

Observaciones y recomendaciones generales



A continuación, se presentan las observaciones y recomendaciones que se desprenden de la evaluación de la información proporcionada por el operador y del diagnóstico en campo y gabinete:

1. En general, la PTAR se encuentra en mal estado operativo, de mantenimiento y de calidad de agua efluente. Se hace evidente que equipos, tuberías e inclusive la obra civil no han recibido el mantenimiento mínimo requerido. Esto se refleja en la mala calidad de agua tratada y el mal estado de todo el tren de lodos, inoperativo.
2. Es necesario evaluar la conveniencia de mantener la operación del filtro biológico dado el poco mantenimiento que se le ha dado en los últimos años.
3. Se recomienda evaluar la incorporación un proceso anaerobio como primera etapa del tratamiento biológico del agua residual y en ese mismo reactor enviar la purga de lodo secundario para su estabilización anaerobia.
4. La incorporación de un proceso anaerobio como tratamiento primario del agua residual y de digestión de lodos, demandaría menores labores de mantenimiento, además de menor costo energético, menor generación de lodo y, por consiguiente, menor consumo de polímero y costo de acarreo y disposición.
5. El proceso anaerobio deberá ser de alta carga para limitar el porcentaje de remoción de materia orgánica y mantener la relación adecuada de NT/DBO en el efluente del reactor anaerobio para efectuar la remoción de nitrógeno en la etapa preanóxica del reactor de lodos activados.
6. Es necesario que el plan de acciones de la PTAR considere el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, especialmente la remoción de nitrógeno y fósforo, para lo cual se requerirá de mayor volumen de reacción en el reactor de lodos activados.
7. Es necesario realizar la rehabilitación de todas las estructuras y equipos de la PTAR, especialmente, pero no limitándose, a las siguientes unidades:
 - Pretratamiento
 - Reactor de lodos activados
 - Clarificador secundario
 - Desaguado de lodo
8. Se recomienda cambiar el proceso de desinfección ultravioleta (abandonado y sin operar) a un sistema de cloro gas ya que es más robusto ante variaciones en la calidad del agua tratada, ser más simple y requerir menos labores de mantenimiento. Debiendo para tal efecto considerar sistemas con caseta de cloración confinada.

9. Se debe considerar una partida importante de los recursos para el desarrollo del resto de la infraestructura de saneamiento como el alcantarillado.
10. Es necesario instalar algún medio para medir el caudal influente a la PTAR, así como realizar determinaciones formales de calidad de agua residual influente para poder desarrollar los planes de ampliación y mejora de la PTAR.
11. Es necesario aumentar el personal de operación que atiende a la PTAR pues es insuficiente para una instalación de este tamaño.
12. Las instalaciones eléctricas actuales representan un riesgo para los trabajadores y para el funcionamiento a largo plazo de los equipos de proceso por lo que deben rehabilitarse. El diseño de canalizaciones y registros, así como la selección de la planta de emergencia, deberá considerar las condiciones ambientales del sitio a manera de garantizar una vida útil adecuada.
13. Es necesario realizar un registro más detallado de las condiciones de operación de la PTAR e implementar un programa para el monitoreo de las aguas residuales que ingresan por medio de pipas.
14. Se recomienda diseñar e implementar un tanque homogeneizador / ecualizador al inicio del tratamiento de la PTAR para amortiguar los picos de carga orgánica proveniente del agua de pipas.
15. Es necesario implementar un programa de capacitación para el personal que ingrese a las PTAR, para establecer un recurso técnico suficiente para solventar los problemas comunes que puedan surgir.
16. Es necesario realizar a corto plazo las acciones para la rehabilitación de todo el tren de lodos, pues la disposición de lodos sin suficiente degradación y a bajas concentraciones de sólidos, representan un foco de contaminación importante para el suelo.
17. Es necesario reforzar los recursos operativos y de mantenimiento de la planta. Especialmente si se tiene en cuenta el acelerado crecimiento poblacional de esta localidad previsto para los próximos años. Cualquier inversión realizada sin su respectivo cuidado, terminará en las mismas condiciones que las actuales.



2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Plantas de tratamiento de agua residual de la CAPA

PTAR Bicentenario, Tulum

En el año 2010 la CAPA efectuó la construcción de la PTAR Bicentenario, con capacidad para un caudal de 120 L/s. En el 2018 se realizó la “Rehabilitación electromecánica de la PTAR Bicentenario, con capacidad de 120 L/s”.

Señala la CAPA que en la actualidad los diferentes módulos presentan condiciones físicas deplorables, incompletas y fuera de servicio por diversos factores.

Actualmente la CAPA pretende realizar la “Reingeniería y ampliación de la PTAR Bicentenario, para ampliar su capacidad de 120 a 240 L/s. Primera etapa” en la que se realizan acciones de mejoramiento en módulos existentes para eficientar sus procesos, la construcción de módulos necesarios para mejor control de los procesos e iniciar la 1ª etapa de construcción de los módulos de ampliación de capacidad para alcanzar 240 L/s.

Las acciones que se proponen para la PTAR Bicentenario consideran que el caudal medio de diseño se mantiene sin cambio respecto al actual, que es de 120 L/s.

Para las tres plantas de la CAPA motivo de estudio, se presentó la opción de incorporar en el tren de agua un sedimentador primario o un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA), previo al reactor de lodos activados.

El RAFA con el beneficio de mayor remoción de DBO ($\approx 65\%$, contra $\approx 35\%$ del sedimentador primario), además de efectuar la estabilización anaerobia del lodo primario y purga de secundario en el RAFA. La CAPA seleccionó incorporar el RAFA en la PTAR Bicentenario. En la Tabla 16 se presenta el resumen de las acciones propuestas para que la PTAR Bicentenario cumpla con las especificaciones y límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para las descargas a suelo cárstico.

Tabla 16:
Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Bicentenario



Etapa de Tratamiento	Bicentenario
TREN DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	Existente, mejoramiento
Regulación agua cruda/pretratada	Se incorpora
Sedimentación primaria	No aplica
Filtro biológico	Se decomisiona a mediano plazo
Biológico remoción DBO	Se incorpora RAFA Lodos activados existente, mejoramiento *
Biológico remoción fósforo	Se incorpora tanque anaerobio *
Biológico remoción nitrógeno	Se incorpora tanque anóxico *
Filtración terciaria	No aplica
Desinfección	UV existente, no opera. Se incorpora Cloro gas *
TREN DE LODO	
Espesado	Se incorpora coespesado en el RAFA
Digestión aerobia	Se decomisiona
Digestión anaerobia	Se incorpora en el RAFA
Desaguado	Existente, mejoramiento

Las acciones que se proponen para la remoción biológica de DBO, fósforo y nitrógeno, así como para la desinfección el agua tratada, son las que están directamente relacionadas para que la planta pueda cumplir con los límites permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021 para las descargas a suelo cársico.

El resto de las acciones se proponen para cumplir uno o más de los siguientes objetivos:



- + Aumentar la capacidad de tratamiento
- + Sustituir equipos obsoletos, fuera de operación o al final de su vida útil
- + Incorporar o modernizar unidades y/o equipos de proceso
- + Optimizar el funcionamiento del tren de tratamiento de agua y/o de lodo
- + Reducir costos de operación
- + Generación de biogás y su valorización energética.

En el tren de tratamiento de agua se incorpora un tanque anaerobio aguas abajo del RAFA, el propósito del tanque es efectuar la asimilación biológica del fósforo efluente del RAFA (mismo que no remueve fósforo) y del fósforo en el agua pretratada derivada al reactor de lodos activados. En el tanque anaerobio del reactor de lodos activados se combinan las corrientes antes referidas con la recirculación de lodo secundario.

En la Tabla 17 se presenta la descripción y características de las acciones propuestas de rehabilitación, mejoramiento o incorporación de etapas y/o equipos para la PTAR Bicentenario.

Tabla 17:
Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Bicentenario

Etapa de tratamiento	Bicentenario
TREN DE AGUA	
Pretratamiento	1. Incorporar caja rompedora de presión, seguida de cribado grueso manual y cribado medio mecánico 2. Incorporar cárcamo ecualizador de caudal • Equipos de bombeo, 3 + R, de 60 L/s, c/u. 3. Ampliación de pretratamiento: • Hidrocribas estática fina de 3 mm, 2 de 130 L/s, c/u • Desarenador / desengrasador (puede ser sólo desarenador, de incorporar sedimentador primario) • Clasificador de arenas y lecho de secado de arena 4. Pretratamiento existente:

Etapa de tratamiento	Bicentenario
	• Sustituir el cribado medio mecánico (RO-1) por 1 hidrocribas estática, de 3 mm y 130 L/s • Rehabilitar y poner en operación la unidad de desarenación /desengrasado (con capacidad para 130 L/s)
Tratamiento Primario	1. Se retira de operación el filtro biológico existente. • Requiere rehabilitar el brazo distribuidor y sustituir material de empaque intemperizado 2. Se incorpora Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente Se elimina el bombeo intermedio, la operación de la planta continua por gravedad Proporciona remoción del 65 % de DBO y SST. 3. Con by pass de agua pretratada al reactor de lodos activados 4. Se efectúa digestión anaerobia de la mezcla de lodo primario y secundario 5. El lodo se purga ya estabilizado, aunque con olor, por tal razón se envía a tanque de aireación de lodo (digestor existente) para eliminar mal olor y H₂S 6. Se genera biogás como subproducto de la remoción de DBO del agua residual y la estabilización de lodos • El biogás se quema para no emitir GEI's
Tratamiento Secundario	1. Incorporar tanque anaerobio para remoción biológica de fósforo • Sin información reciente de concentración de Fósforo en agua cruda 2. Incorporar tanque anóxico para remoción de nitrógeno 3. Aumentar volumen del tanque aerobio existente, volumen adicional adosado al tanque anaerobio y anóxico 4. Rehabilitar/completar capacidad de aireación (4 sopladores centrífugos multietapa, de 75 kw, 1 opera) 5. Incorporar recirculación interna al tanque anóxico 6. Incorporar mezcladores sumergibles al tanque anóxico
Clarificación Secundaria	1. Se utiliza el clarificador existente 2. Incorporar bomba de recirculación de lodo secundario, 1 + R 3. Incorporar bomba de purga de lodo secundario, 1 + R 4. Efectuar la purga de lodo secundario aguas abajo del pretratamiento y previo al RAFA

Etapa de tratamiento	Bicentenario
	Para efectuar coespesado y digestión en el RAFA, se tendrá una sola corriente combinada de lodo primario y lodo secundario.
Tratamiento Terciario	No aplica
Desinfección	- Sustituir sistema ultravioleta por sistema de cloración, definir: - Gas cloro, o - Hipoclorito de sodio - Incorporar tanque de contacto de cloro
TREN DE LODO	
Espesamiento de lodos	- No requiere acciones - El lodo purgado del RAFA se envía por bombeo directo al tanque de aereación de lodo
Digestión de lodos	- Verificar volumen del digestor existente, $\approx 1,000 \text{ m}^3$, podría ser suficiente - No requiere, es tanque de aereación de lodo, para quitar mal olor y características corrosivas al lodo purgado del RAFA - Sopladores, verificar requerimiento de aire 2 soplador lobulares, ninguno opera - Nuevo sistema de difusores
Desaguado de lodos	- Incorporar nuevo filtro banda, de 1.5 metros de ancho de banda - Sistema de preparación y dosificación de polímero El filtro existente se rehabilita y se mantiene como unidad de respaldo - Cárcamo de natas, sobrenadantes y desaguado de lodo - Equipos de bombeo, 2 + 2R
Secado adicional de lodo desaguado	No requiere acciones

Etapa de tratamiento	Bicentenario
TEMAS VARIOS	1. Actualizar el proyecto ejecutivo de la PTAR para adecuar el tren de agua y de lodos a los requerimientos derivados del cambio normativo, en particular la remoción de N y P. 2. Incluir medición de flujo en las corrientes de agua y lodos. 3. Incorporar medición en línea de Nitratos y Nitrógeno amoniacal para control de proceso. Otras acciones previstas por la CAPA: 1. Rehabilitación de reactores biológicos existentes (líneas de aire, válvulas de control, barandales y puente) 2. Rehabilitación de red de fuerza 3. Rehabilitación sistema de alumbrado exterior 4. Clarificador secundario Mantenimiento y sustitución de partes por materiales de fibra de vidrio: la tornamesa central, rastras, jaula, tolva de natas, desnatador y vertedores planos y tipo “V” 5. Espesador de lodo digerido Mantenimiento y sustitución de partes por materiales de fibra de vidrio: tornamesa central, rastras, jaula, tolva de natas, desnatador y vertedores planos y tipo “V” 6. Demolición y reconstrucción de losa de piso y techo de caseta de desaguado de lodos 7. Patio cubierto para secado adicional de lodos, con cargador frontal pequeño tipo bobcat 8. Pozos de infiltración: 3 de 70 L/s, c/u

En la Figura 27 se presenta el diagrama de flujo del tren de tratamiento de agua y de lodos de la PTAR Bicentenario incorporando las acciones propuestas para que la planta produzca agua tratada que cumpla con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas a suelo cárstico.

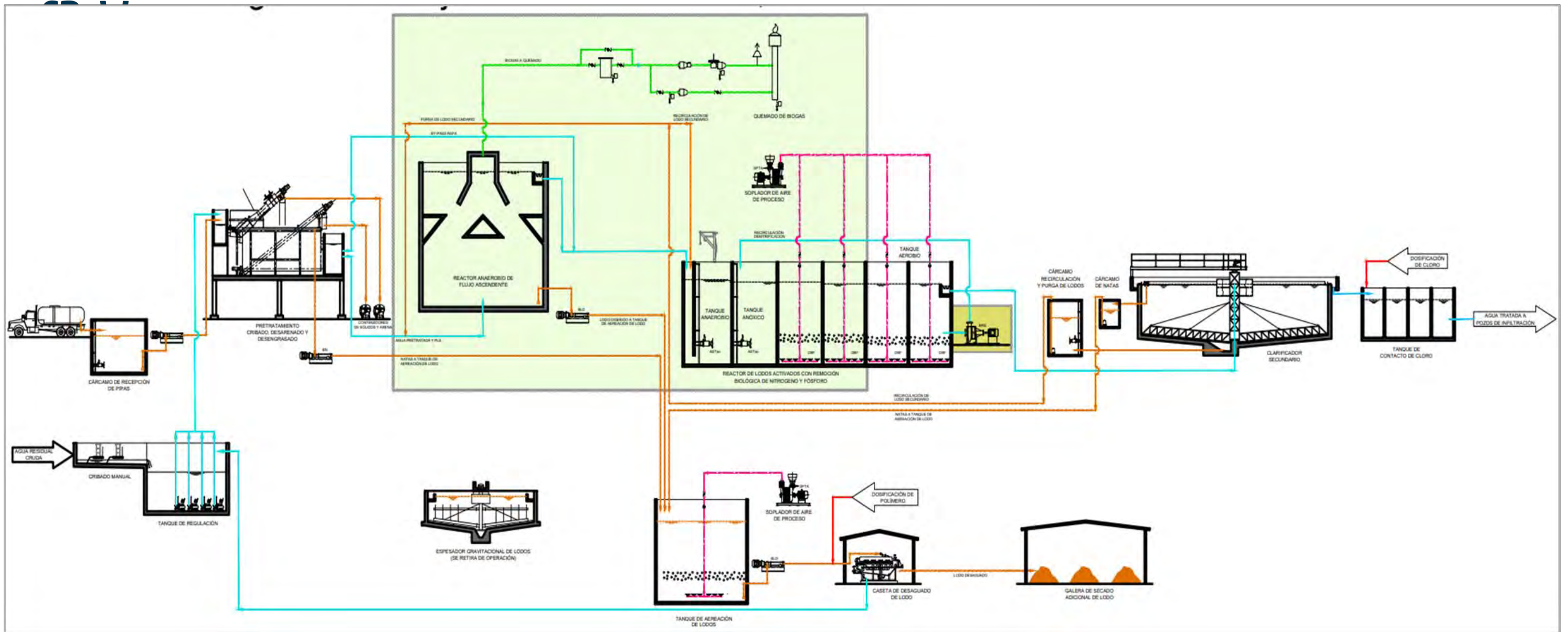


Figura 27 Diagrama de flujo de la PTAR Bicentenario con las acciones propuestas

A decorative graphic consisting of three wavy, horizontal lines in blue, green, and grey, positioned on the left side of the page above the title.

3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Las acciones de mejora surgen de la visita y diagnóstico técnico que se presenta previamente, así como de las entrevistas e información recabada con las áreas responsables de la operación y gestión de los recursos para saneamiento.

Techo financiero

El techo financiero para la implementación de las acciones de mejora y rehabilitación de la PTAR, se realizó a partir de costos paramétricos, como lo indican los Términos de Referencia.

Para lo anterior se recurrió a costos base de unidades de proceso y equipamiento similares y de capacidad comparable con las necesidades de las PTAR que forman parte de este estudio, de igual manera dichos costos son ajustados de acuerdo con la capacidad necesaria.

En la Tabla 18 se muestran los costos base por unidad de proceso, los cuales corresponden al costo de mercado establecido en proyectos realizados en el año 2021 y 2022 en Quintana Roo, en plantas de tratamiento con proceso de remoción biológica de nitrógeno y fósforo, así como equipamiento electromecánico y de proceso, tanto de tipo convencional como relativamente nuevo en la región, como es la filtración terciaria y la desinfección con lámparas ultravioleta.

Tabla 18: Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio

Unidad de proceso	Costo base en MDP
TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	20.97
Regulación agua cruda/pretratada	12.65
Sedimentación primaria	13.12
Caja distribuidora agua primaria	0.99
Filtro biológico	
Remoción Biológica DBO	22.99
Remoción Biológica de fósforo	2.50
Remoción Biológica de nitrógeno	5.75
Clarificación secundaria	14.80
Recirculación y purga de lodo	6.89
Filtración terciaria	12.12
Desinfección	10.49
Pozo de infiltración	1.60
TREN DE TRATAMIENTO DE LODOS	
Espesado de lodo	7.79
Digestión aerobia	16.09
Digestión anaerobia	59.55
Tanque de lodo digerido	3.77
Desaguado de lodo	17.43
Cogeneración	18.81

Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con las acciones a realizar en la PTAR se estimaron los costos de inversión, esto de acuerdo con los costos base y el factor de ajuste, los cuales están relacionado con el caudal de tratamiento.

A continuación se describe el procedimiento aplicado a cada planta de tratamiento (identificada como PTAR "n") para establecer el techo financiero preliminar de los recursos económicos requeridos para implementar el plan de acciones:

1. Los costos de referencia de las unidades de proceso se ajustaron a valores de noviembre de 2022 con el factor de actualización que resulta de dividir el INPC de noviembre entre el INPC del mes en que se originó el presupuesto.

A manera de ejemplo, a continuación se describe el procedimiento:

- Fecha del presupuesto de la unidad de proceso o PTAR de referencia: octubre de 2021.
- Valor del INPC en octubre de 2021: 115.561
- Valor del INPC de noviembre de 2022: 125.997
- Factor de actualización costo de referencia: $125.997/115.561 = 1.090$

2. El costo de referencia del proceso de digestión anaerobia y del sistema de cogeneración se determina con base en un digestor anaerobio con sistemas periféricos; tamizado de lodo, tratamiento lateral de la corriente de desaguado de lodo anaerobio; antorcha de quemado de biogás, gasómetro para almacenar el biogás generado, acondicionamiento de biogás; caseta de equipos de digestión y sistema de cogeneración.

En la siguiente tabla se presenta el desglose y capacidad de los componentes de las etapas de digestión anaerobia de lodos y del sistema de cogeneración:

Etapas de Digestión Anaerobia de Lodo

Concepto	Importe actualizado, mdp
Tamizado de lodo (capacidad para 5 L/s de lodo espesado al 5%)	1.22
Digestor anaerobio mesofílico (de 5,700 m ³)	43.25
Gasómetro de membrana y periféricos (de 1,000 m ³)	6.14
Quemador de biogás y periféricos (capacidad para 225 m ³ /h)	1.59
Edificios operativos	2.71

Concepto	Importe actualizado, mdp
Tratamiento lateral del agua retirada en desaguado de lodo	4.64
Subtotal	59.55
Obra eléctrica (12 % del subtotal)	7.44
Control (3 % del subtotal + obra eléctrica)	2.01
Contingencias (8 % del subtotal + obra eléctrica + control)	5.52
Total	74.53

Sistema de Cogeneración

Concepto	Importe actualizado, mdp
Sistema de tratamiento de biogás (capacidad para 225 m ³ /h) para remoción de humedad, impurezas y H ₂ S	7.10
Sistema integral de cogeneración (capacidad de 500 kW eléctricos)	11.72
Total	18.81

El costo actualizado de las unidades de proceso se ajustó posteriormente en función de la capacidad (a caudal medio) de las unidades de proceso de la PTAR "n", en relación con la capacidad de la PTAR de referencia, acorde a lo siguiente:

$$\text{Costo PTAR "n"} = \text{Costo PTAR de referencia} * ((\text{Tamaño PTAR "n"} / \text{Tamaño PTAR referencia})^{0.70})$$

La capacidad de la PTAR de referencia es para un caudal promedio de 150 L/s.

A manera de ejemplo, al utilizar la ecuación anterior, y considerando que la PTAR "n" es de 350 L/s de capacidad, se obtiene un multiplicador de 1.81, mismo que se aplica sobre el importe de las unidades de proceso de la PTAR de referencia.

De esta forma, en lugar de ajustar el costo de la PTAR "n" con una relación lineal entre el tamaño de ambas plantas (2.33), el criterio toma en cuenta que el costo unitario de inversión (\$ por L/s de capacidad) disminuye al aumentar el tamaño de la unidad de proceso y/o de la PTAR.

Este procedimiento de ajuste de costo se utilizó en las unidades de proceso cuyo

dimensionamiento está determinado por la capacidad y carga hidráulica, como es el caso de las etapas que a continuación se indican:

- Pretratamiento (cribado y desarenación)
- Regulación y/o bombeo de agua cruda/pretratada
- Sedimentación primaria
- Caja distribuidora agua primaria
- Clarificación secundaria
- Recirculación y purga de lodo
- Filtración terciaria
- Desinfección
- Tanque de lodo digerido

Asimismo, el procedimiento de ajuste de costo descrito en este numeral también es aplicable en los procesos biológicos de tratamiento de agua y en las operaciones y procesos del tren de tratamiento de lodos, cuando en la PTAR "n" se presenta la condición de carga influente orgánica y de sólidos que se describe en el siguiente numeral.

3. El factor de ponderación arriba referido se utiliza de manera directa si la carga contaminante influente a la PTAR "n", expresada como la concentración promedio de la DBO y SST en el agua residual cruda, es comparable a la de ($\leq 20\%$) la PTAR de referencia.

La concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente a la PTAR de referencia es 350 mg/L.

Se considera que el agua residual influente a la PTAR "n" es comparable al agua residual de la PTAR de referencia, cuando la concentración promedio de DBO y SST está en el rango de $\pm 20\%$ a la concentración indicada en el párrafo previo.

4. A continuación se enlistan las operaciones y procesos del tren de tratamiento de agua y de lodos que, en caso de variación mayor al 20 % en la concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente, estarían sujetos a ajuste de costo adicional al ya aplicado en el numeral 3.
 - Filtro rociador
 - Reactor de lodos activados, remoción DBO
 - Reactor de lodos activados, remoción de fósforo
 - Reactor de lodos activados, remoción nitrógeno
 - Espesado de lodo
 - Digestión aerobia
 - Digestión anaerobia
 - Desaguado de lodo

En los casos en que la calidad del agua residual influente a la PTAR "n" tiene una variación superior al 20%, hacia arriba o hacia abajo, se procedió a aplicar un ajuste adicional al

costo de inversión en las operaciones y procesos del listado inmediato previo.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual influente es $\approx 30\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.05 o 0.90, según corresponda.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual es $\approx 40\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.12 o 0.80, según corresponda.

5. Se aplicó un factor de ponderación para los casos en que la actividad propuesta no es una unidad de proceso nueva y completa, es decir que consiste en la rehabilitación, mejoramiento o complemento de capacidad de una etapa de proceso o unidad existente.

El valor del factor de ponderación asignado en estos casos está en el rango de 0.35 a 0.65, a criterio del especialista, en función del grado de intervención que se requiere para la unidad de proceso en cuestión.

En términos generales, los valores cercanos al límite inferior del rango se aplicaron cuando la acción implicaba rehabilitación civil única o principalmente; los valores cercanos al límite superior se aplicaron cuando la intervención implica también reequipamiento electromecánico.

6. Una vez establecido el importe de inversión por planta de las principales unidades del tren de tratamiento de agua y de lodos, para determinar el importe de otros componentes de la PTAR a dicho importe se aplicó un valor seleccionado de los rangos de porcentaje que a continuación se indican:

Equipo menor:	5 % a 8 %
Vialidades, patios y obras exteriores:	1 % a 5 %
Obra eléctrica:	10 % a 15 %
Automatización y control:	3 % a 5 %
Imprevistos y contingencias:	8 % a 12 %

7. El importe por elaboración del proyecto ejecutivo de las acciones propuestas por planta se determinó a partir de un porcentaje, en el rango del 1.2 % al 3.5 %, mismo que se aplicó sobre el importe total estimado.
8. El costo de la supervisión de la ejecución y puesta en marcha de las obras y equipamiento propuestas en el Plan de Acciones por planta, se estableció aplicando un porcentaje del 3.5 % sobre el importe total estimado, sin incluir los importes correspondientes al costo

del proyecto ejecutivo y de capacitación.

Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares

La selección de la digestión anaerobia como proceso de tratamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, orientado a la generación de biogás para su aprovechamiento, o bien la opción de instalar paneles solares en estas plantas, ha sido justificada mediante criterios técnicos específicos. Estos criterios incluyen la capacidad operativa de las plantas, la disponibilidad de espacio físico y las propiedades de la carga orgánica influente. En particular, en el caso de las PTAR ubicadas en el Estado de Quintana Roo, el contexto local en que se encuentra cada planta cobra especial relevancia, dado que las condiciones geográficas, ambientales y de infraestructura turística pueden influir en la viabilidad y eficiencia de cada tecnología implementada.

Este análisis permite una decisión fundamentada, buscando optimizar tanto el rendimiento energético como el aprovechamiento sostenible de los recursos locales.

Antecedentes

Como parte del diagnóstico para el mejoramiento de las PTAR de Quintana Roo mayores a 100 L/s, la digestión anaerobia se considera en las siguientes PTAR:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur que recibe también los lodos de la PTAR Caribe
4. PTAR Saas Tun Ha (a futuro, mediano plazo)

Adicionalmente, la instalación de paneles solares se considera en las siguientes PTAR, de las cuales las primeras tres son instalaciones existentes:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur
4. PTAR El Rey
5. PTAR Saas Tun Ha
6. PTAR San Miguelito
7. PTAR Bicentenario
8. PTAR Centenario

Digestión Anaerobia y Cogeneración

La digestión anaerobia es un proceso biológico mediante el cual los lodos residuales se descomponen en ausencia de oxígeno, generando biogás. El biogás, compuesto

principalmente de metano, puede ser aprovechado para producir electricidad y calor mediante sistemas de cogeneración. Además de reducir el volumen de lodos, la digestión anaerobia permite un manejo más eficiente de los residuos, mejorando la sostenibilidad de las plantas al aprovechar el potencial energético del metano.

Los principales aspectos considerados para proponer digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás en las PTAR se presentan en seguida. Todos fueron considerados en conjunto para cada planta.

Condiciones climáticas

La temperatura está relacionada con la velocidad de las reacciones químicas. En el diseño de la digestión anaerobia, la temperatura aumenta la velocidad de hidrólisis y de formación de metano, además disminuye el mínimo tiempo de retención requerido para llegar a una destrucción de sólidos aceptable (38 % en SSV).

Para un proceso mesofílico, que es el seleccionado para las PTAR de Quintana Roo, las temperaturas óptimas se encuentran entre los 30 y 38°C (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014), lo cual es fácilmente alcanzado en la región, con temperaturas de agua residual alrededor de los 30°C todo el año. El no requerir un sistema para control fino de la temperatura es una gran ventaja (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014) de toda la zona.

Carga orgánica influente

Se requiere mantener cierta carga orgánica para mantener el equilibrio entre los microorganismos que realizan la digestión anaerobia y mantener una producción de biogás constante. La carga orgánica alimentada al digester proviene de la fracción de SSV en los lodos generados en el proceso primario y/o secundario y éstos a su vez dependen de las características del agua residual.

En general, la carga orgánica influente necesaria proviene de un análisis detallado del proceso para cada caso, sin embargo, existen lineamientos con reglas generales para anticipar este resultado. En el caso de las PTAR de Quintana Roo, se consideraron para digestión anaerobia las PTAR que en su operación actual o a capacidad plena, recibieran más de 300 L/s o carga orgánica igual o mayor a 7.5 ton DBO/d, esto de acuerdo con estudios técnicos realizados previamente por GIZ (GIZ, 2017).

Toxicidad

La digestión anaerobia es un proceso sensible a variaciones de pH y puede verse afectada por la presencia de ciertas sustancias inhibitoras en las aguas residuales. Para la instalación de una nueva PTAR, es fundamental realizar análisis previos para descartar la presencia de estos compuestos que puedan interferir en el proceso. En el presente caso, dado que las PTAR evaluadas ya están en operación, se ha verificado que en los sitios propuestos para la digestión anaerobia no se han registrado historiales de inhibiciones significativas al proceso biológico,

lo que garantiza su viabilidad.

Volumen y tipo de lodos generados

Una de las principales ventajas de la digestión anaerobia es la generación de biogás, siendo más eficiente esta generación cuanto mayor es la carga orgánica en los sólidos alimentados. En los sitios propuestos, además de lodos secundarios, se procesan lodos primarios con alto contenido de SSV, lo que incrementa la generación de biogás. Las altas cargas orgánicas influentes a las plantas aseguran buena generación de sólidos, maximizando la eficiencia del sistema de digestión.

Disponibilidad de espacio

Los sitios con propuesta de digestión anaerobia fueron revisados para la disponibilidad de espacio para una unidad de digestión anaerobia junto con gasómetro e instalaciones de cogeneración y manejo de biogás.

Disponibilidad operativa

La digestión anaerobia es una unidad significativamente más compleja que las demás en el tren de tratamiento, lo que demanda mayor capacidad técnica y un personal operativo especializado para su correcta operación a lo largo de la vida útil de la PTAR. En las plantas propuestas, se considera que cuentan con el personal y la capacidad técnica necesarios para implementar y mantener este proceso de manera eficiente.

Viabilidad operativa

Con base en la calidad de agua, la temperatura, el caudal influente y el tipo de proceso, es posible estimar la cantidad de lodos producidos en cada PTAR. Los lodos producidos son la base para estimar el tamaño ideal del digestor anaerobio. De acuerdo con la literatura (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014) el tiempo de retención recomendado para los lodos a 30°C es de 6 a 14 días y la carga orgánica puede variar entre los 1.6 y 4.8 kg SSV/m³ d.

A manera de ejemplo, con el volumen de 5,700 m³/d y a una carga de 2.4 kg SSV/ m³ d sería posible alimentar hasta 13.7 toneladas al día de lodo. Este flujo másico a una concentración de 3.5 % en sólidos tendría un tiempo de residencia de 14.6 días. La producción de lodo actual de las PTAR seleccionadas para digestión anaerobia varía entre 6.7 y 9.9 toneladas al día, y puede ser aún mayor de acuerdo con la capacidad de tratamiento de agua residual instalada. El volumen seleccionado considera este crecimiento además de las necesidades actuales.

Conclusiones para biogás y cogeneración

Los aspectos anteriores se analizaron y forman parte del análisis de costo presentado. En general en las PTAR seleccionadas es positiva la presencia de la digestión anaerobia. En resumen, para seleccionar las PTAR donde es viable instalar digestión anaerobia se consideró que:

1. La temperatura de la zona es favorable con 30°C.
2. La carga orgánica influente a las PTAR y/o el caudal se encuentran en el umbral de 7.5 ton/d de DBO o 300 L/s de caudal tratado.
3. Los procesos biológicos existentes no presentan obstáculos por sustancias inhibidoras.
4. La presencia de lodo primario favorece la producción de biogás.
5. Existe suficiente espacio para la instalación de las unidades respectivas.
6. Existe suficiente personal operativo y capacidad técnica para mantener la unidad funcionando eficientemente.
7. El volumen seleccionado como base para los costos cubre los rangos de operación actuales y futuros de cada PTAR.
8. En el balance económico, la producción y aprovechamiento del biogás es un instrumento importante para hacer viable la operación de las PTAR más grandes.

Generación de Energía Solar

A diferencia de la digestión anaerobia, la instalación de paneles solares es un proceso más sencillo y viable para prácticamente cualquier PTAR. El criterio principal para su implementación fue la disponibilidad de espacio en la planta y su tamaño, siendo seleccionadas aquellas de mediana o gran escala.

Las plantas que no tienen suficiente carga orgánica para justificar la digestión anaerobia, pero disponen de amplias áreas, pueden aprovechar los paneles solares para reducir su dependencia de la red eléctrica y generar energía renovable de manera sostenible. En consecuencia, esta tecnología se considera para casi todas las PTAR.

El costo de implementación de ambas tecnologías no es equivalente, siendo la digestión anaerobia considerablemente más costosa. Sin embargo, como se muestra en el análisis económico, la generación de biogás a escalas superiores al umbral establecido por la GIZ produce una cantidad significativa de energía eléctrica, generando importantes ahorros a largo plazo. Además, la digestión anaerobia requiere una mayor capacidad técnica para su operación. En contraste, los paneles solares, más sencillos de instalar y mantener, representan una opción accesible y conveniente para todas las PTAR.

A continuación se presenta una tabla resumen con los principales criterios utilizados para la selección de digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás, así como para la instalación de paneles solares.

		Principales Criterios para selección de Digestión Anaerobia						Criterio de selección para la instalación de Paneles Solares	
Nombre de la planta	Capacidad instalada (L/s)	DBO entrada (mg/L)	Carga orgánica influente (Ton DBO /día)	Carga orgánica > 7.5 ton / día	Sedimentación primaria (Lodo primario)	Disponibilidad operativa	Digestión Anaerobia	Espacio disponible	Paneles solares
Bicentenario (Tulum)	120	559	5.8	NO	NO	NO	NO	SI	SI

Resumen de inversión, techo financiero

En la Tabla 19 se muestra el monto de inversión por unidad de proceso o componente de proyecto, y en la Figura 28 se muestra su distribución porcentual.

Tabla 19:

Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Etapa o componente		Importe PTAR Bicentenario, mdp's
Proyecto ejecutivo		1.50
Bombeo / regulación / pretratamiento / primario		18.89
Remoción DBO y nutrientes, desinfección		31.48
Tratamiento terciario		
Tren de tratamiento de lodos		10.21
Digestión anaerobia		
Cogeneración		
Paneles solares		8.40
Equipo menor		4.83
Terracerías, vialidades, patios		2.76
Obra eléctrica		10.35
Automatización y control		2.07
Imprevistos y contingencias		8.28
Supervisión		3.42
Capacitación		0.40
Total		102.57

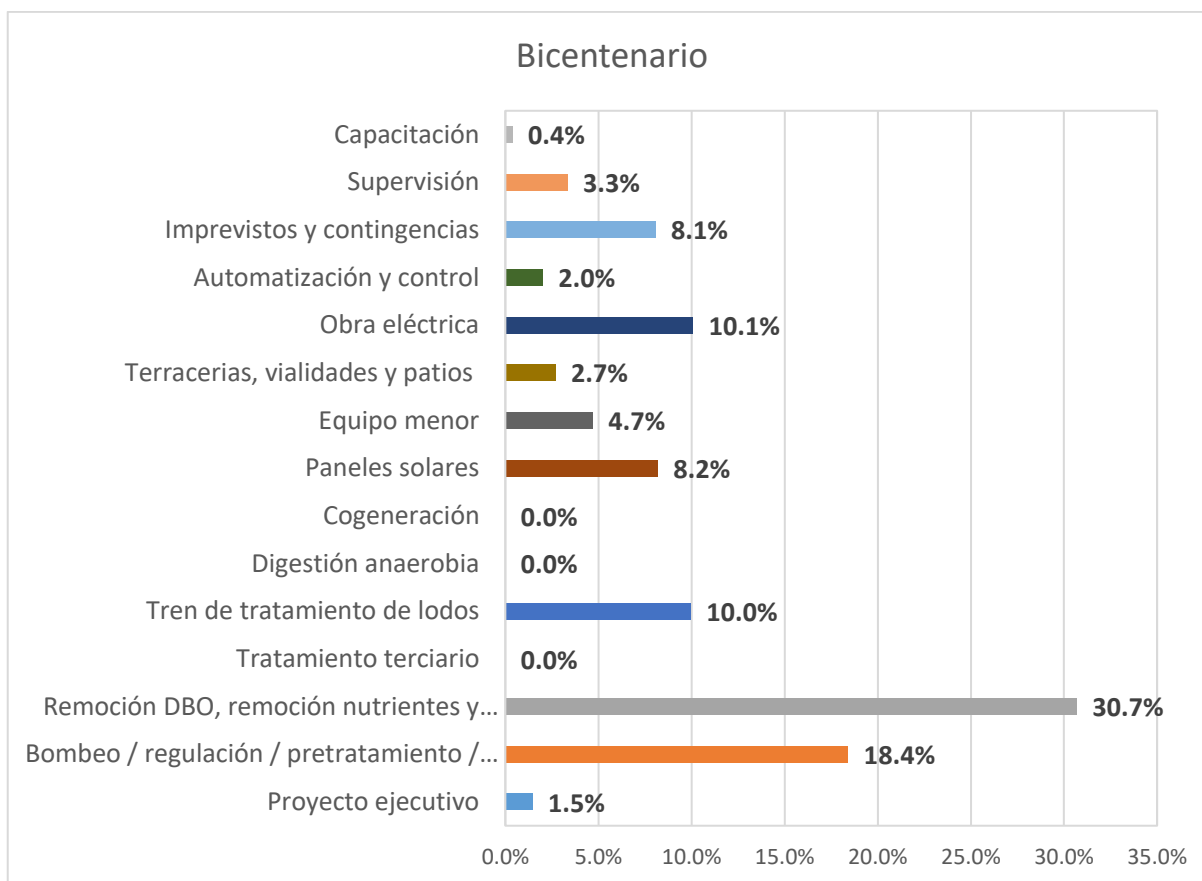


Figura 28 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

En la Tabla 20 se muestra el resumen del techo financiero total.

Tabla 20:
Monto de inversión, millones de pesos

PTAR	Capacidad instalada, L/s	Capacidad propuesta, L/s	Inversión requerida	Inversión Digestión Anaerobia	Inversión Cogeneración	Inversión Paneles solares	Inversión Total	Inversión unitaria, k\$/lps
Bicentenario	120	120	94.2	--	--	8.4	102.6	855

A continuación, se muestra la estimación detallada de costos, se indica la unidad de proceso, el factor de ajuste integrado y monto de inversión estimado, así como los porcentajes aplicados a las obras complementarias: vialidades, obra eléctrica, de control e

instrumentación, imprevistos, proyecto ejecutivo, supervisión y capacitación.

Tabla 21:
Estimación detallada de costos PTAR Bicentenario

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tren de Tratamiento de Agua		
Pretratamiento mecánico	0.38	8.07
Regulación agua cruda/pretratada	0.86	10.82
Sedimentación primaria		
Caja distribuidora agua primaria		
Filtro biológico		
Biológico remoción DBO	0.64	14.75
Biológica remoción de fósforo	0.86	2.14
Biológico remoción nitrógeno	0.86	4.92
Clarificación secundaria		
Recirculación y purga de lodo	0.43	2.95
Filtración terciaria		
Desinfección	0.64	6.73
Pozos de infiltración		
Tren de Tratamiento de Lodos		
Espesado		
Digestión aerobia	0.17	2.75
Digestión anaerobia		
Tanque de lodo digerido		
Desaguado	0.43	7.46
Cogeneración		8.40
Subtotal		68.98
Equipo menor	7.0%	4.83
Terracerías, vialidades y patios	4.0%	2.76
Obra eléctrica	15.0%	10.35
Automatización y control	3.0%	2.07
Imprevistos y contingencias	12.0%	8.28
Proyecto ejecutivo		1.50
Supervisión		3.42
Capacitación		0.40
Total		102.57



4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Este programa de inversiones es el resultado de las acciones propuestas para mejorar la calidad del agua tratada de las PTAR's con capacidad de tratamiento igual o mayor a 100 L/s en el estado de Quintana Roo, así como el presupuesto derivado del plan de acciones. La programación de las inversiones se basa en las necesidades propias de cada planta considerando el objetivo principal, que es el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

El 5 de diciembre de 2022 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación los:

LINEAMIENTOS que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Los Lineamientos constan en total de veintitrés artículos, más un artículo transitorio, así como el denominado Anexo A: Instructivo para la Información Requerida en el Sistema.

Los Lineamientos están estructurados en seis capítulos:

- Capítulo Primero, Disposiciones Generales

- Capítulo Segundo, Requisitos para la Presentación y Registro de los Programas para el Cumplimiento
- Capítulo Tercero, De los Plazos de los Programas para el Cumplimiento
- Capítulo Cuarto, Procedimiento para la presentación, registro y revisión de los Programas para el Cumplimiento, así como del Informe de Avances
- Capítulo Quinto, De las Verificaciones
- Capítulo Sexto, De las Sanciones

Aspectos Clave de los Lineamientos

Artículo 2. Sujeto Regulado: El responsable de descargas de aguas residuales al que resulte aplicable la NOM-001-SEMARNAT-2021, quien podrá presentar sus Programas para el Cumplimiento ante la Comisión.

Artículo 5. La presentación del Programa para el Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, **es de naturaleza voluntaria**, por lo que, en caso de su incumplimiento, el responsable de la descarga de aguas residuales en cualquier cuerpo receptor propiedad de la nación, quedará sujeto a los plazos establecidos en la mencionada Norma Oficial Mexicana

Artículo 6. El Sujeto Regulado presentará su Programa para el Cumplimiento, en los siguientes supuestos:

- a) Cuando **deba modificar sus instalaciones** con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como el Apéndice Normativo de la NOM-001-SEMARNAT-2021, y que los ajustes y acciones que se deban ejecutar de acuerdo con los estudios realizados por dicho Sujeto Regulado rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor, en el Artículo 2o Transitorio de la NOM, o bien,
- b) Que el Sujeto Regulado **deba modificar los procesos productivos de las actividades que generan la descarga de aguas residuales**, con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como al Apéndice Normativo y que dichas modificaciones, de acuerdo con los análisis o la evidencia del Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor.

Artículo 7. El Sujeto Regulado, en caso de presentar el Programa para el Cumplimiento lo hará por cada uno de los puntos autorizados en su Permiso de Descarga, y que, para cumplir con las disposiciones establecidas en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se ubiquen en alguno de los supuestos establecidos en el Artículo 6 de los Lineamientos.

Artículo 8. Una vez registrado el Programa para el Cumplimiento, y en tanto este se encuentre

vigente, en concordancia con el Artículo 5º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, el Sujeto Regulado deberá cumplir, además de lo comprometido en el Programa, con los límites y parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, para gozar de los beneficios e incentivos que para tales efectos establezca la LFD vigente.

Artículo 10. El Programa para el Cumplimiento, contendrá:

- + Nombre, denominación o razón social del Sujeto Regulado;
- + RFC del Sujeto Regulado;
- + Datos de identificación del Permiso de Descarga; Volumen de descarga; Datos del medidor o dispositivo de medición de las aguas residuales descargadas; Coordenadas del punto de descarga;
- + Datos generales del representante legal; Correo electrónico;
- + Justificación de la solicitud para la aplicación del Programa para el Cumplimiento;
- + Cronograma de actividades para las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento; Periodo solicitado;
- + E-Firma del Sujeto Regulado o representante legal.

Artículo 12. Los Programas para el Cumplimiento deberán presentarse ante la CONAGUA, por el Sujeto Regulado **a partir de que entre en vigor la NOM-001-SEMARNAT-2021 y hasta el 3 de abril del 2023.**

El Sujeto Regulado que no presente su Programa para el Cumplimiento en el periodo señalado, se sujetará a los plazos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 13. Los plazos que se establezcan en el Cronograma de Actividades para el seguimiento de las acciones comprometidas en los Programas para el Cumplimiento **no deberán rebasar el 11 de marzo de 2027.**

Artículo 15. La CONAGUA realizará revisiones aleatorias a los Programas para el Cumplimiento, podrá solicitar al Sujeto Regulado, las aclaraciones o información adicional que considere necesarias. En el supuesto de que el Sujeto Regulado no atienda el requerimiento de información dentro de los veinte días hábiles siguientes, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y será aplicable lo establecido en el Artículo 2º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 16. Una vez registrado el Programa ante la CONAGUA, no será objeto de modificación, salvo en el caso que el Sujeto Regulado justifique la necesidad de realizar algún cambio y no exceda el plazo originalmente establecido.

Artículo 17. El Sujeto Regulado debe presentar **dentro de los primeros cinco días hábiles de los meses de marzo y septiembre de cada año**, a partir de la fecha del registro, el avance de actividades mediante la carga de información que solicite el Sistema de Gestión en el apartado correspondiente al Informe de Avance del Programa para el Cumplimiento. Cuando el Sujeto Regulado no envíe en tiempo y forma la información del Informe de Avance, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y se aplicarán las disposiciones de la NOM-001-

SEMARNAT-2021.

Artículo 21. La CONAGUA procederá a cancelar el Programa para el Cumplimiento y su registro, cuando compruebe que el Sujeto Regulado no ha cumplido con lo comprometido en el programa registrado. La CONAGUA, procederá a notificar la cancelación del Programa, por lo que quedarán sin efectos las acciones de cumplimiento propuestas por el Sujeto Regulado en su respectivo Programa, aplicándose las disposiciones correspondientes de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 22. Cuando las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento presentado impliquen la suspensión de sus procesos productivos y actividades para llevar a cabo las acciones tendientes a la conversión de procesos productivos o la instalación de maquinaria, equipos o plantas que se requieran para el cumplimiento de los parámetros y límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, y deba quedar fuera de operación el sistema de tratamiento de aguas residuales, el Sujeto Regulado deberá dar aviso a la CONAGUA, al menos 30 días hábiles antes de que esto ocurra, e indicar el periodo por el que prevalecerá dicha situación, el cual **no deberá exceder de tres meses**, y podrá presentarse **hasta un máximo de dos ocasiones** durante la vigencia del Programa.

De llevar a cabo la suspensión de sus procesos de tratamiento de aguas residuales sin el aviso correspondiente se aplicarán las sanciones previstas. Una vez recibida la solicitud, el Sistema de Gestión emitirá el comprobante que acreditará que la solicitud fue hecha en tiempo y forma.

Artículo 23. En caso de incumplimiento a los compromisos establecidos en el Programa para el Cumplimiento, quedan sin efecto las prerrogativas que ampara dicho documento, por lo cual el Sujeto Regulado será acreedor a las sanciones que correspondan y, en su caso, estará obligado a efectuar el pago de los derechos por el uso y aprovechamiento de cuerpos receptores de descargas de aguas residuales propiedad de la nación, a partir de la fecha del incumplimiento, así como de aquéllos que se hubieren generado con anterioridad, con sus accesorios, conforme a la LFD vigente.

Programa de inversión anual

Como se mencionó anteriormente, el monto de inversión total del Plan de Acciones es de 102.57 millones de pesos (mdp), inversión a realizarse en 5 años a partir del año 2023 hasta marzo del 2027, acorde al plazo previsto en los Lineamiento que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el presente apartado se muestra el desglose anual del Plan de Acciones, donde se describe el monto de inversión por año y unidad de proceso y/o componente del proyecto programado, así como los importes anuales y acumulados y su porcentaje de participación en la inversión.

Tabla 22:
Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado

Clav e	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
A	Proyecto ejecutivo	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50
		100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
B	Cárcamo, regulación, pretratamiento, y/o tratamiento primario	0.00	11.33	7.56	0.00	0.00	18.89
		0.0%	60.0%	40.0%	0.0%	0.0%	100.0%
C	Tren de tratamiento de agua	11.02	11.02	9.44	0.00	0.00	31.48
		35.0%	35.0%	30.0%	0.0%	0.0%	100.0%
D	Tratamiento terciario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
E	Tren de tratamiento de lodos	0.00	6.13	4.08	0.00	0.00	10.21
		0.0%	60.0%	40.0%	0.0%	0.0%	100.0%
F	Cogeneración (y/o paneles solares)	0.00	0.00	0.00	6.72	1.68	8.40
		0.0%	0.0%	0.0%	80.0%	20.0%	100.0%
G	Equipo menor	0.86	1.95	1.44	0.46	0.12	4.83
		17.8%	40.4%	29.9%	9.5%	2.4%	100.0%
H	Terracerías, vialidades y patios	0.49	1.11	0.83	0.26	0.07	2.76
		17.8%	40.4%	29.9%	9.5%	2.4%	100.0%
I	Obra eléctrica	1.84	4.18	3.10	0.99	0.25	10.35
		17.8%	40.4%	29.9%	9.5%	2.4%	100.0%
J	Automatización	0.37	0.84	0.62	0.20	0.05	2.07

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
		17.8%	40.4%	29.9%	9.5%	2.4%	100.0%
K	Imprevistos y contingencias	1.47	3.34	2.48	0.79	0.20	8.28
		17.8%	40.4%	29.9%	9.5%	2.4%	100.0%
L	Supervisión	0.61	1.38	1.02	0.33	0.08	3.42
		17.8%	40.4%	29.9%	9.5%	2.4%	100.0%
M	Capacitación	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.40
		0.0%	50.0%	50.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	Total Anual y Gran total, mdp's	18.15	41.48	30.76	9.74	2.44	102.57
	Acumulado anual, mdp's	18.15	59.63	90.40	100.14	102.57	
	Total Anual y Gran total, %	17.7%	40.4%	30.0%	9.5%	2.4%	100%
	Acumulado anual, %	17.7%	58.1%	88.1%	97.6%	100.0%	

A continuación se muestra de manera gráfica el monto de inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR:

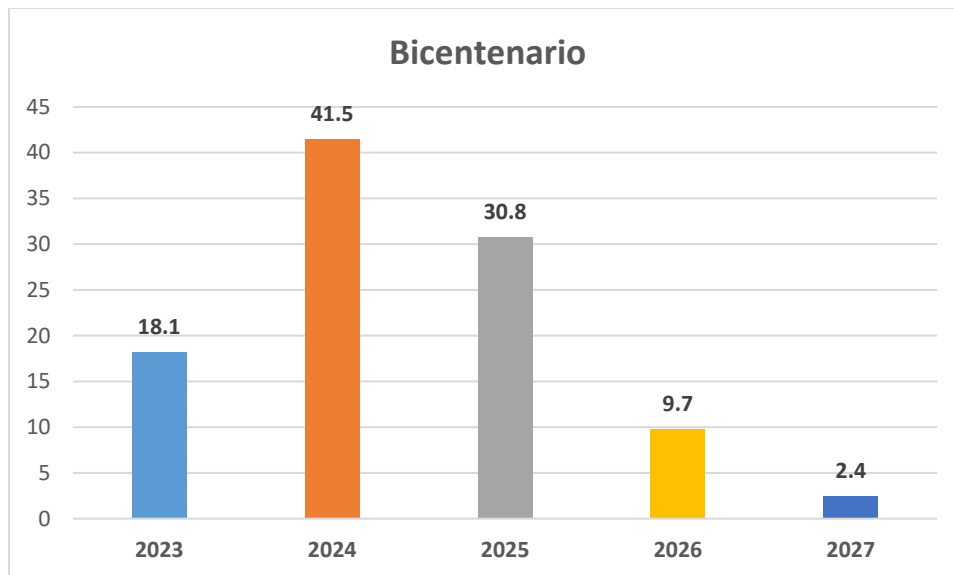


Figura 29 Inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR Bicentenario, mdp's

Bibliografía

- CONAGUA. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. . México: CONAGUA.
- GIZ, C. A. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Mexico: GIZ.
- Metcalf & Eddy / AECOM. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. NY: McGraw-Hill.
- Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4a ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Caribe

Contenido

PTAR Caribe	1
Contenido	4
Índice de Tablas	5
Índice de Figuras.....	7
1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más.....	9
Descripción general de la PTAR Caribe.....	9
Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases	10
Descripción general del proceso	12
Diagrama de flujo de proceso	13
Descripción de las unidades de proceso	14
Tren Biológico de Tratamiento de Agua.....	14
Tren Físicoquímico de Tratamiento de Agua	18
Tren de Tratamiento de Lodo.....	24
Estado de conservación y operación de las instalaciones PTAR Caribe	29
Análisis de calidad del agua cruda.....	31
Calidad de agua cruda, histórica	31
Calidad de agua cruda, de este Estudio	32
Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada.....	35
Calidad de agua tratada, histórica.....	35
Calidad de agua tratada, de este Estudio.....	37
Parámetros de operación del reactor de lodos activados	40

Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua	42
Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR	43
Costos de operación y mantenimiento (O & M) reportados por el Organismo Operador ..	43
Estimación de los costos de operación y mantenimiento	44
Observaciones y recomendaciones generales	49
2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	50
3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	55
Techo financiero	55
Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales	57
Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares	61
Resumen de inversión, techo financiero	65
4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	69
Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	69
Aspectos Clave de los Lineamientos	70
Programa de inversión anual	72
Bibliografía.....	76

Índice de Tablas

Tabla 1: Dimensiones Reactores de Lodos Activados PTAR Caribe	14
Tabla 2: Dimensiones Clarificadores Secundarios PTAR Caribe	15
Tabla 3: Dimensiones Tanque de Contacto de Cloro PTAR Caribe	15
Tabla 4: Dimensiones Tratamiento primario con químicos	19

Tabla 5: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren biológico de tratamiento de agua.....	22
Tabla 6: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren fisicoquímico de tratamiento de agua	23
Tabla 7: Evaluación de los criterios de diseño del tanque de contacto de cloro	23
Tabla 8: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo	27
Tabla 9: Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)	32
Tabla 10: Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente	34
Tabla 11: Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)	35
Tabla 12: Caracterización del agua tratada de este Estudio (<i>E.coli</i> y Huevos de helminto)	38
Tabla 13: Cumplimiento del agua tratada.....	39
Tabla 14: Oxígeno disuelto en reactor de lodos activados de la PTAR Caribe	40
Tabla 15: Coordinada de pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR	42
Tabla 16: Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales	44
Tabla 17: Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M.	46
Tabla 18: Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Caribe	50
Tabla 19: Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Caribe	51
Tabla 20: Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio	56
Tabla 21: Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	65
Tabla 22: Monto de inversión, millones de pesos.....	67
Tabla 23: Estimación detallada de costos PTAR Caribe.....	67
Tabla 24: Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado	73

Índice de Figuras

Figura 1 Vista Aérea PTAR Caribe	9
Figura 2 Diagrama de flujo de proceso actual PTAR Caribe	13
Figura 3 Cárcamo final Nichupté	16
Figura 4 Vistas reactores de lodos activados	17
Figura 5 Licor mezclado efluente de reactor de lodos activados; clarificadores secundarios 1 y 2	17
Figura 6 Clarificador secundario 2 y 3, cárcamo de recirculación y purga de lodo; agua clarificada efluente	17
Figura 7 Tanque de contacto de cloro y caseta de cloración; scrubber para neutralización de fugas de cloro	18
Figura 8 Agua tratada efluente del tanque de contacto de cloro; brocal de pozo de infiltración de agua tratada	18
Figura 9 Cárcamo final (Sur) y unidad de pretratamiento con criba fina de tambor y cono ...	20
Figura 10 Cámara de floculación y clarificador lamelar del TPQ.....	21
Figura 11 Bombas de recirculación y purga de lodo químico; línea efluente del TPQ a tanque de contacto de cloro.....	21
Figura 12 Espesador gravitacional de lodo; vista exterior del digestor aerobio de lodo.....	25
Figura 13 Vista interior del digestor aerobio de lodo; sopladores del digestor	25
Figura 14 Filtro banda para desaguado de lodo; sistema de preparación de polímero	26
Figura 15 Banda transportadora de lodo desaguado; cárcamo de bombeo agua de rechazo de desaguado	26
Figura 16 Caracterización del agua cruda (sep-2022)	33
Figura 17 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)	36
Figura 18 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)	37
Figura 19 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)	38
Figura 20 Pruebas de sedimentabilidad PTAR Caribe	40

Figura 21 Pozos de infiltración PTAR Caribe	42
Figura 22 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m ³	47
Figura 23 Diagrama de flujo de la PTAR Caribe con las acciones propuestas	54
Figura 24 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	66
Figura 25 Inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR.....	75

1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más

Descripción general de la PTAR Caribe

La PTAR Caribe se localiza dentro de la zona urbana de Cancún. El área servida es la franja centro sur de la ciudad, delimitada al este por las avenidas Bonampak y Tulum, al oeste por las avenidas Chichen Itzá y López Portillo; al sur por las avenidas Cancún y Fonatur, y al oeste por la calle Pedregal Bonfil. En la Figura 1 se presenta la vista satelital de la PTAR Caribe.



Figura 1 Vista Aérea PTAR Caribe

Aguakan es responsable de la operación y mantenimiento de la PTAR, así como de la obtención de los recursos económicos requeridos para su ampliación, modernización, rehabilitación y sustitución de equipos.

Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases

La PTAR Caribe inició su operación en el año de 1993, tiene capacidad nominal para tratar un caudal medio de 225 L/s, la información proporcionada por Aguakan indica que el caudal medio tratado en el año 2021 y 2022 fue de 132 L/s.

La PTAR Caribe consta de dos procesos de tratamiento de agua de operación independiente, uno de tipo biológico y otro fisicoquímico, compartiendo la etapa de desinfección y disposición final de agua tratada, además del tren de tratamiento de lodo.

La capacidad nominal de tratamiento original era para un caudal medio de 150 L/s, en esta primera etapa (año 1993), la PTAR Caribe estaba integrada por las unidades y etapas de proceso del tren biológico de tratamiento de agua y el tren de tratamiento de lodo.

Al parecer en la primera etapa la PTAR no contaba con un sistema formal de pretratamiento, salvo el cribado grueso que se efectuaba en el Cárcamo Final (Nichupté). En la primera etapa sólo el Cárcamo Final (Nichupté) aportaba a la PTAR. Alrededor del año 2000 se efectuó la construcción del Cárcamo Final (Sur) que recibe los aportes de agua residual de la denominada Reserva Sur, para elevarlos e ingresarlos a la PTAR.

La segunda etapa de la PTAR, efectuada en los años 2003 y 2004, consistió en la ampliación a la capacidad actual de 225 L/s, así como en la mejora del proceso de agua y de lodos. En esta etapa se incorporó el tren de tratamiento de agua de tipo fisicoquímico, además del pretratamiento y unidades mecánicas de espesado y desaguado de lodo.

A continuación se indican las operaciones y procesos que conforman los trenes de tratamiento de la PTAR Caribe, el valor entre paréntesis indica el número de unidades:

Tren biológico de tratamiento de agua:

- + Cárcamo final (Nichupté)
- + Reactor de lodos activados (3), con aereadores mecánicos de alta velocidad
- + Clarificador secundario (3)
- + Desinfección con gas cloro, caseta confinada con scrubber para neutralización de fugas (1)
- + Tanque de contacto de cloro (1)
- + Pozos de infiltración de agua tratada (6)

Tren de tratamiento de lodo:

- + Espesador gravitacional (1), no opera
- + Mesa de espesado de lodo (1), no opera
- + Digestión aerobia (1), aireación difusa
- + Desaguado mecánico, en filtro banda (1)
- + Destino del lodo desaguado, se traslada a la PTAR Norponiente para secado adicional de lodo.

Tren físico químico de tratamiento de agua:

- + Cárcamo final (Sur)
- + Pretratamiento (1), consistente en cribado fino, desarenación y desengrasado (sin unidades formales de manejo de natas y arenas).
- + Tratamiento primario avanzado con químicos "TPQ" (1), sistema Densadeg:
- + Incluye Mezcla rápida, Reactor Floculador y Sedimentador primario lamelar.

Los lodos primarios y secundarios que se generarán en el nuevo módulo de tratamiento de la PTAR Caribe serán enviados crudos y desaguados a la PTAR Sur para su estabilización y desaguado. En la PTAR Sur se efectuará la estabilización, mediante digestión anaerobia, del lodo primario y secundario de la PTAR Caribe.

La PTAR Caribe se asienta en un terreno con superficie aproximada de 4.2 hectáreas, con espacio para futuras ampliaciones. Aguakan comunicó que en el año 2023 se iniciará la construcción de un módulo nuevo con capacidad para 225 L/s con calidad de agua tratada acorde a la NOM-001-SEMARNAT-2021. A continuación, se indican las operaciones y procesos que conformarán la modernización de la PTAR Caribe para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Tren de tratamiento futuro:

- + Cárcamo final (nuevo, dentro del predio de la PTAR, sustituye el cárcamo existente en Av. Nichupté).
- + Pretratamiento
- + Sedimentación primaria
- + Remoción biológica de fósforo
- + Reactor de lodos activados con remoción de nitrógeno
- + Clarificador secundario
- + Desinfección de agua tratada, con rayos ultravioleta
- + Espesado y desaguado de lodo primario y secundario crudo
- + Acarreo de lodo crudo desaguado a PTAR Sur

Descripción general del proceso

En la actualidad el agua residual que ingresa al Cárcamo Final (Norponiente) se dirige directamente a los reactores de lodos activados con aereación superficial, el licor mezclado se conduce hacia los clarificadores secundarios. Desde estas unidades se realiza el retorno de lodos a los reactores y la purga de lodo.

El agua residual que ingresa al Cárcamo Final (Sur) se envía al pretratamiento, con cribado fino mecánico y un cono desarenador / desengrasador, el agua pretratada pasa al tratamiento fisicoquímico consistente en una cámara de mezcla rápida, reactor floculador y sedimentador primario con lamelas. Se aplica un coagulante y floculante para mejorar el desempeño de la sedimentación.

El agua secundaria proveniente del tren biológico y el agua primaria del tren fisicoquímico ingresan al tanque de contacto de cloro para su desinfección con gas cloro. El agua tratada se dispone en el subsuelo mediante pozos de infiltración.

La purga de lodo primario del tren fisicoquímico y secundario del tren biológico biológico se envían hacia el digestor aerobio de lodo, el lodo digerido es enviado a un filtro prensa para su desaguado.

Diagrama de flujo de proceso

Para facilitar la comprensión de los procesos de tratamiento, más adelante, en la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo simplificado del proceso actual de tratamiento de agua y lodos.

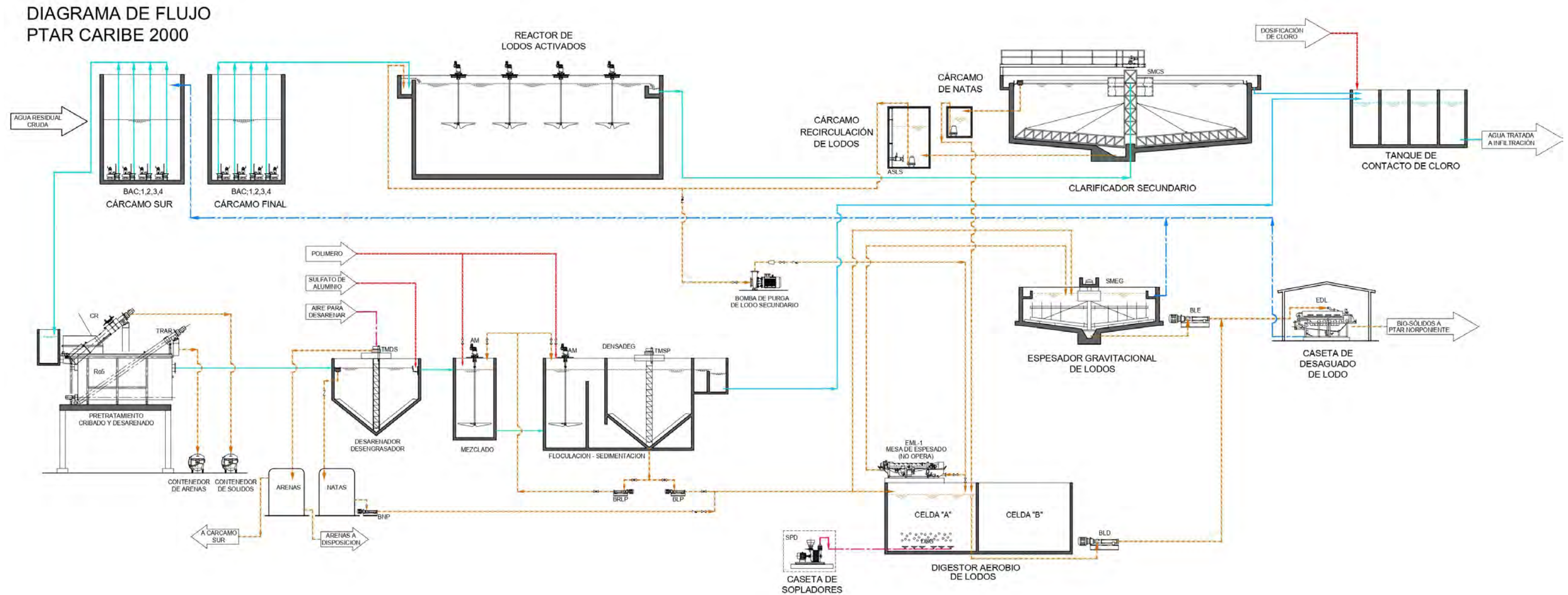


Figura 2 Diagrama de flujo de proceso actual PTAR Caribe

Descripción de las unidades de proceso

Como parte del trabajo de campo elaborado en este Estudio, se recopiló información sobre las características, dimensiones y condiciones de operación y mantenimiento de las unidades de proceso de la PTAR.

Tren Biológico de Tratamiento de Agua

Cárcamo final Nichupté

Se localiza fuera del predio de la PTAR, en el límite noreste del predio de la PTAR (esquina Av. Nichupté y Av. Kinik). Está equipado con dos bombas sumergibles, 1 de 50 hp y 1 de 100 hp. La línea de impulsión de agua residual atraviesa la parte norte y central del predio de la PTAR, con destino al reactor de lodos activados. El arreglo mecánico permite enviar agua residual al tren físico químico de tratamiento de agua.

Pretratamiento

El tren biológico de agua no cuenta con equipo de pretratamiento, sin embargo, en el canal de ingreso al reactor de lodos activados hay rejillas gruesas de limpieza manual.

Reactores de lodos activados

La PTAR cuenta con tres reactores de lodos activados con operación en paralelo. La aireación se realiza por medio de agitadores mecánicos de alta velocidad, con dos agitadores por reactor. Al momento de la visita, los seis aireadores se encontraban en operación. Las dimensiones de los reactores se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1:
Dimensiones Reactores de Lodos Activados PTAR Caribe

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	3
Largo	m	28.0
Ancho	m	13.5
Tirante hidráulico	m	3.0
Volumen total	m ³	3,402

Clarificador secundario

Son tres unidades, alimentadas por cada uno de los reactores respectivamente. Cada clarificador cuenta con rastras y brazo desnatador con accionamiento en columna central. Sus dimensiones se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2:
Dimensiones Clarificadores Secundarios PTAR Caribe

Concepto	Unidad	Valor
Diámetro	m	18.5
Número de unidades	No.	3
Área	m ²	269
Tirante hidráulico, SWD	m	3.0
Volumen	m ³	807

La recirculación y purga de lodo secundario se efectúa a través de un cárcamo tipo húmedo común para los tres clarificadores, equipado con tres bombas sumergibles. La purga de lodo se efectúa con los equipos de bombeo de recirculación, con destino al tren de lodo.

Desinfección

El tanque de contacto de cloro recibe y combina el efluente secundario de buena calidad con el efluente del TPQ con calidad del agua de regular a mala, turbia y con sólidos. En la Tabla 3 se presentan las dimensiones del tanque de contacto de cloro.

Tabla 3:
Dimensiones Tanque de Contacto de Cloro PTAR Caribe

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	1
Largo	m	22.5
Ancho	m	8.5

Concepto	Unidad	Valor
Tirante hidráulico	m	2.8
Volumen total	m ³	535.5

El proceso de desinfección se efectúa con gas cloro; se cuenta con un sistema de tres básculas y tres cilindros de 908 kg en operación, grúa para izaje e instalación de cilindros, sensores de fugas, etcétera.

La planta tiene una central de cloración de tipo confinado con scrubber químico para el control y neutralización de las fugas de gas cloro. Se tiene planta de emergencia dedicada para los sistemas de desinfección y de control y neutralización de fugas.

Disposición y aprovechamiento de agua tratada

Del tanque de contacto de cloro el agua tratada se dirige a alguno de los pozos de infiltración. El agua tratada se observa de mala calidad, no se efectúa aprovechamiento o reúso. La planta cuenta con seis pozos de infiltración, aunque el personal de operación indica que uno de ellos tiene muy baja capacidad de infiltración.

Vistas del tren biológico de tratamiento de agua

De la Figura 3 a la Figura 8 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren biológico de tratamiento de agua de la PTAR.



Figura 3 Cárcamo final Nichupté



Figura 4 Vistas reactores de lodos activados



Figura 5 Licor mezclado efluente de reactor de lodos activados; clarificadores secundarios 1 y 2



Figura 6 Clarificador secundario 2 y 3, cárcamo de recirculación y purga de lodo; agua clarificada efluente



Figura 7 Tanque de contacto de cloro y caseta de cloración; scrubber para neutralización de fugas de cloro



Figura 8 Agua tratada efluente del tanque de contacto de cloro; brocal de pozo de infiltración de agua tratada

Tren Físicoquímico de Tratamiento de Agua

Cárcamo final Sur

Se localiza dentro del predio de la PTAR, en el lado Sur, frente a la Av. Politécnico, está equipado con dos bombas sumergibles en operación, 1 de 30 hp y 1 de 50 hp. La línea de impulsión del cárcamo se incorpora con la línea que proviene del cárcamo final Nichupté, previo a su ingreso al pretratamiento.

Pretratamiento

El tren físicoquímico cuenta con cribado fino mecánico tipo tambor rotario con tornillo transportador/prensa de sólidos. Posteriormente el agua pasa a un cono desarenador /

desengrasador, equipo con aereación, rastras y brazo desnatador.

- + Las arenas se descargan a una losa con rejilla y pendiente para retirar el agua, la cual se conduce al cárcamo final Sur.
- + Las grasas se descargan por gravedad a un tanque de almacenamiento de polietileno, se retiran de la planta con equipo tipo vactor.

Tratamiento primario con químicos (TPQ)

Es un sistema patentado denominado Densadeg, que consta de las siguientes unidades:

- + Mezcla rápida, Reactor Floculador y Sedimentador primario lamelar.
- + Con dosificación de sulfato de aluminio líquido y polímero aniónico; cuenta con estación de preparación y dosificación de polímero.
- + Bombas de desplazamiento positivo para recircular lodo al reactor floculador; clarifloculador; bombas para purga de lodo al digestor.

En Tabla 4 se presentan las dimensiones de las principales unidades del tratamiento primario con químicos:

Tabla 4:
Dimensiones Tratamiento primario con químicos

Concepto	Unidad	Valor
Mezcla rápida		
Número de unidades	No.	1
Área	m ²	12.6
Volumen	m ³	75.4
Reactor floculador		
Número de unidades	No.	1
Área	m ²	32.5
Volumen	m ³	195
Sedimentador primario lamelar		

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	1
Área	m ²	57.5
Volumen	m ³	333.8

Vistas del tren fisicoquímico de tratamiento de agua

De la Figura 9 a la Figura 11 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren fisicoquímico de tratamiento de agua de la PTAR.

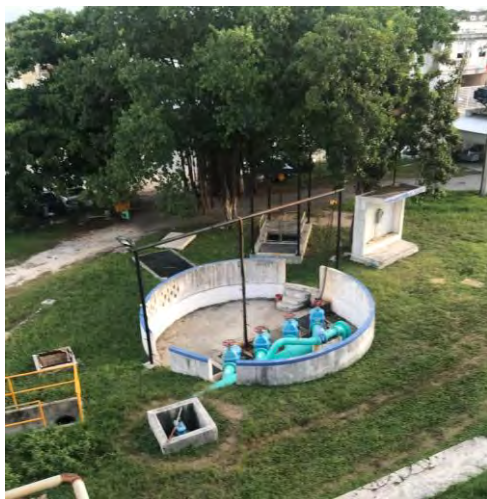


Figura 9 Cárcamo final (Sur) y unidad de pretratamiento con criba fina de tambor y cono

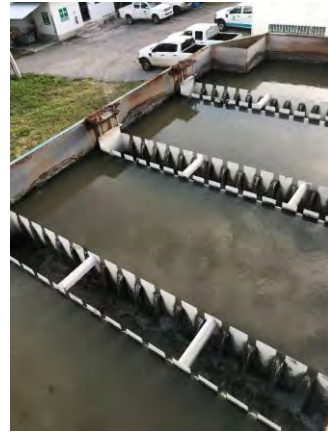


Figura 10 Cámara de floculación y clarificador lamelar del TPQ



Figura 11 Bombas de recirculación y purga de lodo químico; línea efluente del TPQ a tanque de contacto de cloro

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua

Con el fin de verificar que las principales estructuras de proceso del tren de tratamiento de agua sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes en el agua cruda, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para tal efecto se utilizaron las dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior, los datos de caudal y calidad de agua cruda utilizados son los siguientes:

- + Caudal medio de diseño $\rightarrow 225 \text{ L/s}$
 - Caudal tren biológico $\rightarrow 150 \text{ L/s}$
 - Caudal tren fisicoquímico $\rightarrow 75 \text{ L/s}$

- + Calidad de agua cruda promedio (histórico)
 - DBO, 279 mg/L
 - SST, 262 mg/L

En las siguientes tablas se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren biológico y fisicoquímico de tratamiento de agua, además del rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR Caribe con las dimensiones de las estructuras, en caso de no contar con algún dato de operación se asignó un valor promedio del rango típico.

Los rangos típicos indicados para el reactor y clarificador son para procesos de lodos activados con mezcla completa.

Tabla 5:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren biológico de tratamiento de agua

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Caribe
Reactor de Lodos Activados			
Concentración de DBO influente al reactor	mg/L	No aplica	279
Concentración de SSTLM	mg/L	3,000 - 4,000	3,500
Fracción volátil		0.7 a 0.8	0.75
Relación F/M	kg/kg - d	0.2 a 0.6	0.40
Carga volumétrica	KgDBO/m ³ - d	0.3 a 1.6	1.06
Tiempo hidráulico de retención total	horas	5 a 15	6.3
Tirante hidráulico	m	4.5 a 7.5	3.0
Clarificador Secundario			
Carga hidráulica superficial, Caudal medio	m ³ /m ² -d	16 a 28	16.1
Recirculación	%	25 a 100%	100%
Carga de sólidos, Caudal medio	Kg/m ² - h	4 a 6	4.7
Tirante hidráulico	m	4 a 5	3.0

1 Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

Tabla 6:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren fisicoquímico de tratamiento de agua

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Caribe
Mezcla rápida			
Tiempo de mezcla	s	5 a 30	1,005
Floculación			
Tiempo de mezcla	s	1,800 a 3,600	2,600
Sedimentador primario lamelar			
Carga hidráulica superficial, Caudal medio	m ³ /m ² -d	30 a 70	113

1 Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

Tabla 7:
Evaluación de los criterios de diseño del tanque de contacto de cloro

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Caribe
Tiempo hidráulico de retención	min	30	39.7

De las tablas anteriores surgen los siguientes comentarios:

- + Los principales criterios de diseño de las unidades del tren de tratamiento biológico están dentro de los rangos típicos recomendados en la bibliografía especializada para mezcla completa.
- + El reactor de lodos activados tiene bajo tirante hidráulico, esta condición reduce la eficiencia de transferencia de oxígeno de los sistemas de aire difuso por lo que no sería conveniente cambiar a esta tecnología con este mismo reactor.
- + El clarificador secundario también tiene bajo tirante hidráulico, lo que reduce su eficiencia.
- + En lo que respecta al tren de tratamiento fisicoquímico, el tiempo de mezcla rápida es superior al recomendado en la bibliografía especializada, el tiempo de floculación si se encuentra dentro del rango típico. La carga hidráulica superficial es superior a la recomendada para este tipo de procesos.

- + Acorde al histórico de datos proporcionado por Aguakan (2020-2021), que se encuentra dentro del apartado de Bases de Datos, en el sedimentador primario con químicos se tiene una remoción promedio de DBO del 34% y de SST del 58%, dentro de los rangos típicos de sedimentadores primarios convencionales bien diseñados, en sedimentadores primarios con químicos, las remociones deben ser mayores, entre el 50 y 80% de la DBO y 80 y 90% de los sólidos (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014).
- + Este bajo desempeño hace que el efluente mixto (agua primaria y secundaria) tenga una calidad muy mala.

Tren de Tratamiento de Lodo

Digestor aerobio de lodo

El digestor aerobio de lodos recibe por bombeo la purga de lodo secundario, las natas secundarias y la purga del sedimentador primario con químicos.

El espesador gravitacional de lodo no se utiliza para espesar, es tanque con aereación; se retiró una mesa espesadora que estaba instalada sobre el digestor.

El digestor de lodo es de planta rectangular con aereación de tipo difuso de burbuja gruesa, tiene un volumen útil aproximado de 300 m³.

Para la aereación del digestor se tienen instalados y en operación dos sopladores de tipo lobular, ya en el sitio y por instalarse un soplador centrífugo de 50 hp. Se observa ineficiente e insuficiente la aereación y mezcla en el digestor.

Desaguado de lodo y Secado

El lodo digerido se desagua en un filtro banda con ancho de banda de 3.0 metros, equipo muy viejo, aunque operativo. Se menciona que se efectúa desaguado tres días por semana. Se cuenta con estación de preparación de polímero y bombas dosificadoras.

El lodo digerido es enviado a desaguado a través de dos bombas de desplazamiento positivo, una en operación y una en mantenimiento.

El lodo desaguado se eleva con dos bandas transportadoras inclinadas para descarga en góndola, después es enviado a la PTAR Norponiente para secado adicional en patio.

El agua que se remueve del lodo en la etapa de desaguado se capta en un cárcamo que la envía por bombeo al cárcamo final Sur.

Otros

- + Se tiene medición de caudal de agua cruda influente, en los dos cárcamos (Sur y Av. Nichupté).
- + Medición de agua tratada en la línea efluente del tanque de contacto de cloro.
- + Sin medición de flujo en las diversas corrientes del tren de tratamiento de lodo.
- + La PTAR Caribe recibe descargas de pipas y vactors con aguas residuales y lodos de origen doméstico y, al parecer, de tipo no doméstico. Las pipas efectúan los vertidos directamente al Cárcamo Final de la Av. Nichupté.

Vistas del tren de tratamiento de lodo

De la **Error! Reference source not found.** a la **Error! Reference source not found.** se muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de lodo de la PTAR



Figura 12 Espesador gravitacional de lodo; vista exterior del digestor aerobio de lodo



Figura 13 Vista interior del digestor aerobio de lodo; sopladores del digestor



Figura 14 Filtro banda para desaguado de lodo; sistema de preparación de polímero



Figura 15 Banda transportadora de lodo desaguado; cárcamo de bombeo agua de rechazo de desaguado

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de lodo

Con el fin de verificar que las principales estructuras y equipos de proceso del tren de tratamiento de lodo sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño más relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para esta evaluación se consideraron las siguientes premisas de cálculo:

- + Dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior.
- + Producción de lodos, se estimó con base en la fórmula simplificada de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) con los datos de caudal medio de diseño y calidad de agua cruda promedio del histórico (SST y DBO), mismos

que se utilizaron para la evaluación del tren de agua (US EPA, 1993).

- + Para determinar el volumen de lodos se utilizaron las concentraciones típicas esperadas en la purga de lodo secundario y purga de lodo primario con químicos.
- + Para determinar el volumen de lodo que ingresa al digestor, se calculó una concentración ponderada de la mezcla de lodo primario y secundario sin espesar.
- + De manera conservadora, se consideró que el equipo mecánico de desaguado opera 5 días por semana 16 horas por día.
- + En la Tabla 8 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de lodo, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR Caribe con las dimensiones de las estructuras y capacidades de equipos, en caso de no contar con algún dato de operación se consideró un valor promedio del rango típico.

Tabla 8:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Caribe
Producción de lodo			
Producción de lodo esperada	kg SST /día	No aplica	5,259
Concentración		2 a 6%	1.13%
Flujo volumétrico	m ³ /día	No aplica	464
Digestión Aerobia de lodo			
Carga de sólidos volátiles	kgSSV/m ³ -d	1.6 a 4.8	13.1
Tiempo de retención hidráulico (edad de lodo)	días	15 a 20	0.6
Destrucción esperada		38 a 50%	20.0%
Masa de lodo digerido estimada	kg SST /día		4,470
Desaguado de Lodo (filtro banda)			
Captura de sólidos	%	>95%	95%
Carga de sólidos (por metro)	kg/h	250 a 410	130

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Caribe
Carga hidráulica (por metro)	L/min	150 a 340	226

1 Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + El esquema actual de operación del tratamiento de lodos no es adecuado, dado a que prácticamente la única operación que se realiza es la del desaguado de lodo parcialmente digerido por medio del filtro banda.
- + No hay espesado de lodos y el digestor está limitado en cuanto a su volumen útil. La carga de sólidos en el digestor es muy alta y la edad de lodos muy baja, no se logra la destrucción de SSV requerida para el cumplimiento de la NOM-004.
- + En cuanto al desaguado, la carga de sólidos e hidráulica en el filtro banda es adecuada, pero es un equipo viejo está al final de su vida útil y con requerimientos de mantenimiento frecuentes y crecientes.

Estado de conservación y operación de las instalaciones PTAR Caribe

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de agua de la PTAR Caribe, evaluadas con base en el cumplimiento de la NOM-001-2021 para suelo cárstico en DQO, SST, NT y PT con el promedio histórico de calidad de agua, se clasifican de **“Regulares a Malas”**. En la sección **Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada**, se presenta la evaluación de dicha información.

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de lodos, determinadas con base en las condiciones operativas y de desempeño de las operaciones de espesado, digestión y desaguado observadas en la visita, se clasifican como **“Malas”**.

En términos generales las condiciones de mantenimiento de los trenes de tratamiento de agua y de lodos se consideran **“Regulares”**.

En los párrafos subsecuentes se describe lo observado en la visita técnica efectuada a la PTAR.

La PTAR Caribe es una instalación de tratamiento “vieja”, que está por cumplir 30 años en operación. El diseño de sus operaciones y procesos, así como las dimensiones y características físicas de las unidades responden a criterios, prácticas y objetivos de tratamiento que ya no aplican y/o son obsoletas, destacando los siguientes aspectos:

- + Alto costo de operación del sistema de tratamiento primario con químicos
- + Carencia de pretratamiento en el agua residual que ingresa a tratamiento secundario
- + Aireación mecánica poco eficiente en los reactores de lodos activados
- + Bajo tirante hidráulico en los reactores de lodos activados
- + Baja profundidad de pared lateral en los clarificadores secundarios
- + Carencia de equipo de espesado de lodos
- + Volumen insuficiente en el digestor aerobio de lodos

Adicionalmente, en la visita de campo se observaron los problemas e insuficiencias que a continuación se indican:

- + Severa corrosión en los componentes metálicos de tanques e internos de las unidades que conforman el Tratamiento Primario con Químicos, en especial las expuestas a la interfase agua – atmósfera.
- + Deterioro estructural con fisuras y exposición de acero de refuerzo en algunas secciones de los reactores de lodos activados, clarificadores secundarios y espesador gravitacional de lodo.
- + Deterioro estructural severo y riesgo de falla con fisuras y acero de refuerzo expuesto en la caseta de desaguado de lodos y el edificio de taller y almacén al que esta adosado.
- + Las instalaciones hidráulicas y civiles de los pozos de infiltración de agua se observan con severo deterioro y carentes de registros, protección y de adecuado mantenimiento; además carecen de medición de caudal en cada pozo, la medición se efectúa a la salida del tanque de

contacto de cloro.

Con respecto al equipamiento mecánico se observa lo que a continuación se describe:

- + Condiciones adecuadas de operación y mantenimiento los equipos de bombeo de agua y lodos, así como en los aireadores del reactor de lodos activados.
- + Se observa deterioro moderado y corrosión en el equipo de cribado fino, y en la estación de preparación de polímero para desaguado de lodo.
- + Las rastras, tornamesas e internos de los clarificadores secundarios registran condiciones moderadas de deterioro;
- + Los sopladores lobulares para el digestor de lodos, además de obsolescencia e ineficiencia energética, tienen problemas de mantenimiento que inciden en su adecuada operación.
- + El filtro banda para desaguado de lodo, si bien está en condiciones operativas, muestra fuerte corrosión y deterioro en sus elementos estructurales y mecánicos. Esta condición se debe a que tiene 30 años en operación y a las características del lodo que ha desaguado: insuficientemente estabilizado y/o lodo primario de origen químico.
- + La central de cloración y el sistema de control y neutralización de fugas de gas cloro fueron construidos en el año 2015, en la actualidad presentan muy buenas condiciones operativas y de mantenimiento.

La obra e instalaciones eléctricas, como son la subestación, el Centro de Control de Motores, red de fuerza y alumbrado exterior se observan en condiciones adecuadas de mantenimiento.

La dirección de Aguakan está consciente de la obsolescencia, insuficiencia y deterioro de la PTAR Caribe, para tal efecto cuenta con el proyecto ejecutivo para la construcción de una nueva planta con objetivos de calidad de agua tratada acordes a la NOM-001-SEMARNAT-2021.

La nueva PTAR Caribe tendrá capacidad para tratar un caudal medio de 450 L/s, modulados en dos trenes de tratamiento de agua. Los lodos primarios y secundarios a generar serán acarreados, crudos y desaguados, a la PTAR Sur, donde serán estabilizados.

En la futura PTAR Caribe sólo se mantendrán en operación la caseta de cloración y el tanque de contacto de cloro existentes, el resto de las instalaciones de tratamiento de agua y lodos serán demolidas y sustituidas por nuevas estructuras.

La dirección de Aguakan manifestó que tiene programado iniciar la construcción del primer módulo de tratamiento de agua a partir del año 2023. Con el fin de mantener operativa la planta, Aguakan tiene previsto instalar en breve un nuevo soplador centrífugo para la aereación del digestor de lodos, así como la instalación de nuevas bombas de desplazamiento positivo para el manejo de diversas corrientes del tren de lodo. Los equipos mencionados se observaron en el almacén de la PTAR.

En el Anexo 1 (Ficha de la PTAR) se presenta la descripción detallada de las características y condiciones actuales de operación y mantenimiento de las estructuras y equipos del tren de agua y lodos.

Análisis de calidad del agua cruda

Calidad de agua cruda, histórica

Se incluyen diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos, la información fue proporcionada por Aguakan, los análisis fueron efectuados por el laboratorio interno del organismo operador. Los parámetros incluidos en las bases de datos de Aguakan son los siguientes:

- + Temperatura
- + pH: Potencial de hidrógeno
- + Conductividad
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos sedimentables
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Sólidos suspendidos volátiles (SSV)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂) (efluente)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃) (efluente)
- + Nitrógeno amoniacal (N-NH₃)
- + Nitrógeno total (NT) (efluente)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)
- + Coliformes fecales
- + Cloro residual libre
- + Transmitancia (efluente)
- + Absorbancia (efluente)

Debido a que los resultados de los muestreos fueron previos a la actualización de la NOM-001-SEMARNAT-2021, las bases de datos no incluyen los parámetros adicionales de la nueva norma, como color verdadero, toxicidad y *E. Coli*, así mismo incluyen parámetros que no son objeto de estudio en la actual norma, sin embargo, si permiten determinar la calidad de los procesos de tratamiento del agua residual.

Se proporcionaron datos de 197 muestreos efectuados en el influente durante el periodo del año 2020 al 2021 de tipo compuesto.

A continuación se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Caribe.

Tabla 9:
Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)

Concepto	Q prom. L/s	pH	SST mg/L	SSV mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	G & A mg/L	NTK mg/L	PT mg/L
No. De datos	197	197	197	197	102	197	24	95	23
Mínimo	103.2	6.7	60	19	137	237	30.0	38.01	5.72
1° cuartil	130.2	7.3	183	135	245	573	52.3	66.74	8.35
Promedio	145.6	7.4	262	196	279	663	135.0	72.89	9.14
Mediana	143.5	7.4	250	187	269	650	71.5	74.62	9.10
3° cuartil	159.4	7.5	300	235	316	727	160.8	79.18	9.97
Máximo	271.7	7.8	940	700	494	1,314	610.0	102.47	13.70

Calidad de agua cruda, de este Estudio

Del 22 al 23 de septiembre se efectuó un muestreo compuesto de 24 horas tanto en el influente y efluente de la PTAR Caribe, este se efectuó con seis muestras simples, a cada una de estas se les realizaron los siguientes análisis de campo:

- + pH
- + Temperatura del agua
- + Cloro residual libre (efluente)

Los parámetros analizados en el laboratorio fueron los siguientes:

- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)

- + Fósforo total (PT)
- + Escherichia coli (efluente)
- + Toxicidad Vibrio fischeri (efluente)
- + Huevos de helminto
- + Color verdadero (UV-Vis) a 436, 525 y 620 nm

Las actividades de colecta, preservación y análisis de las muestras fueron realizadas por personal de Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis (Intertek + ABC Analitic), éste cuenta con la acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA) en la rama de agua número AG-096-029/11 para su laboratorio ubicado en la ciudad de México y AG-096-029/11_S1 para el laboratorio de Mérida, que es donde se realizarán los análisis.

En todos los casos, la preservación y el almacenamiento de las muestras se efectuaron de acuerdo con los lineamientos que establece la normatividad mexicana. Las muestras colectadas fueron preservadas con hielo a una temperatura de 4°C con la intención de que no se degradaran, y fueron transportadas en una hielera al laboratorio correspondiente para su análisis.

El transporte se hizo con sumo cuidado, de tal forma que se evitaron los derrames y/o contaminación de muestras debido a rupturas de frascos o cualquier otro accidente. Los diferentes frascos que integran las muestras se preservaron con los reactivos señalados en la normatividad.

En la Figura 16 se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Caribe. En el Anexo 3 se presentan los resultados completos del laboratorio del influente y efluente de la PTAR Caribe.

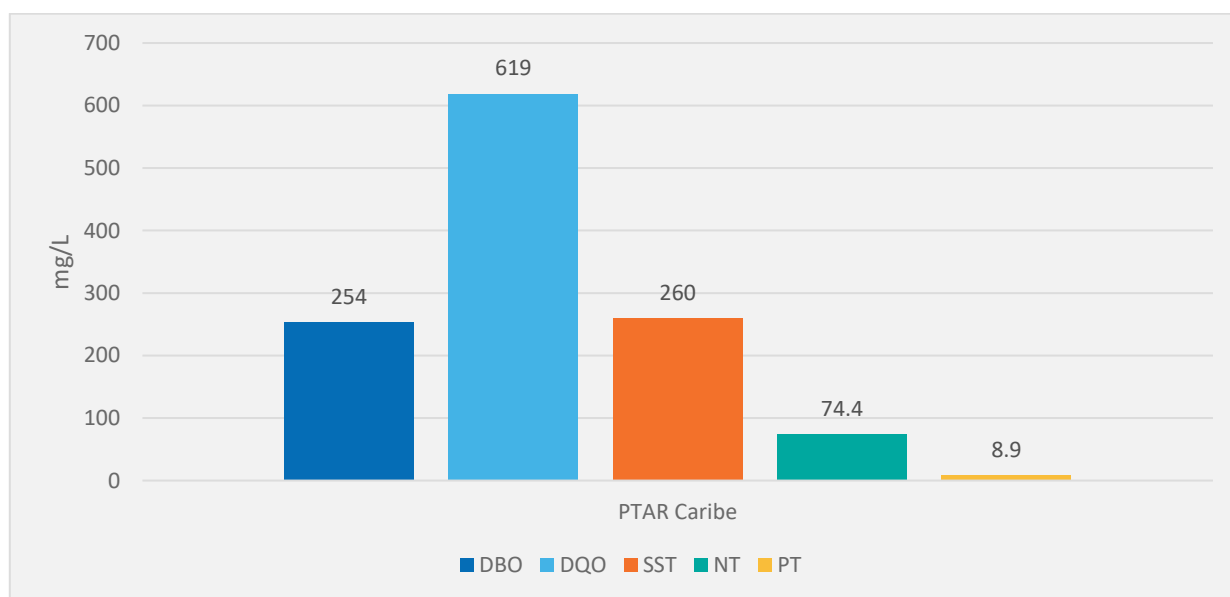


Figura 16 Caracterización del agua cruda (sep-2022)

Con la finalidad de conocer la relación de contaminantes, se realizaron los cálculos que a continuación se presentan en la siguiente tabla, los cuales fueron determinados con los promedios obtenidos anteriormente en la tabla y figura previas.

Tabla 10:
Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente

Relación	Promedio (2020-2021)	Valor Estudio 2022	Rango típico en Aguas Residuales Municipales ¹
DBO5/ DQO	0.42	0.41	0.45 – 0.55
SST/ DBO	0.94	1.02	0.80 – 1.20
SSV / SST	0.75	Sin dato	0.70 – 0.80
NTK/ DBO	0.26	0.29	0.10 – 0.20
Fósforo/ DBO	0.03	0.04	0.02

¹ (US EPA, 1993)

Las relaciones presentadas en la tabla anterior del histórico y de los valores obtenidos en este Estudio, en general se encuentran dentro o muy cerca de los rangos típicos en aguas residuales municipales.

Se observa una relación de NTK/DBO mas alta del rango típico, esto probablemente se deba a la sedimentación de la DBO particulada en el sistema de alcantarillado.

Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada

En las siguientes figuras y tablas se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada del histórico de datos proporcionados por Aguakan y de los obtenidos en el presente Estudio, en estas se presentan los límites permisibles (LP) establecidos en la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelo cárstico.

Tanto los datos de calidad de agua cruda y tratada proporcionados por el organismo operador se encuentran en el apartado Bases de Datos.

Calidad de agua tratada, histórica

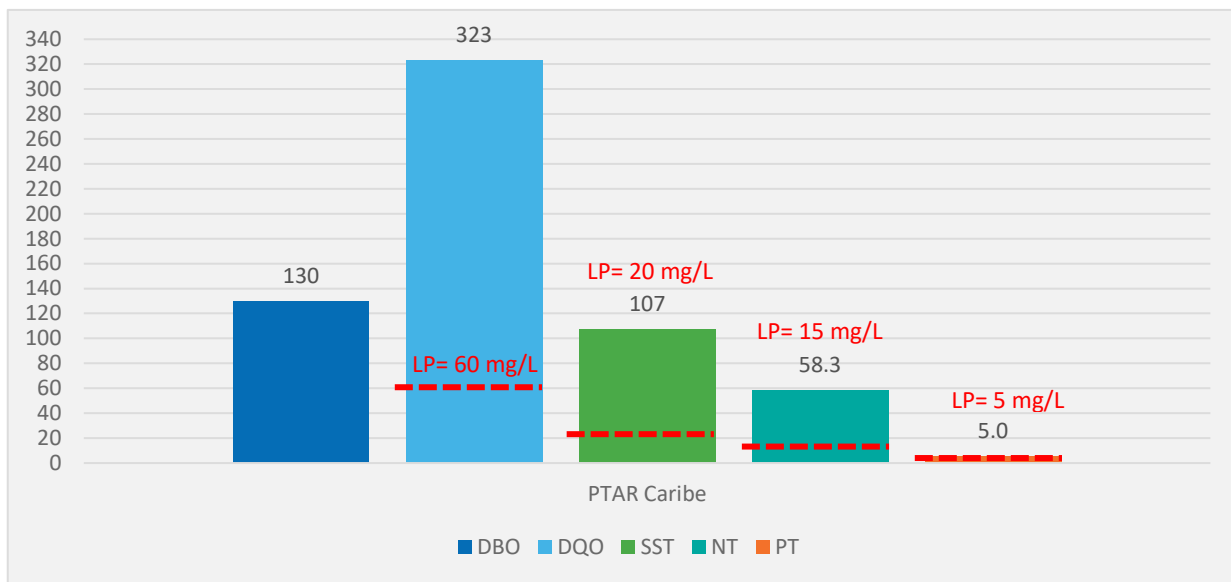
Se proporcionaron datos de 196 muestreos de tipo compuesto efectuados en el efluente durante el periodo del año 2020 al 2021.

En la siguiente tabla se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros en el agua tratada de la PTAR Caribe.

Tabla 11:
Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)

Concepto	Q prom. L/s	SST mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	G & A mg/L	NTK mg/L	NT mg/L	PT mg/L
No. de datos	197	196	102	196	24	94	94	23
Mínimo	103.2	20	57	82	4.0	22.18	25.58	1.97
1° cuartil	130.2	62	106	254	12.3	52.52	53.98	4.00
Promedio	145.6	107	130	323	30.8	57.25	58.32	5.04
Mediana	143.5	88	128	312	16.5	58.61	59.46	4.83
3° cuartil	159.4	140	147	383	39.5	64.06	64.88	6.04
Máximo	271.7	440	325	586	146.0	91.70	93.95	8.88

A manera de resumen en la Figura 17 se presentan los valores promedio de los principales parámetros del agua tratada de la PTAR Caribe, en esta se indican los límites permisibles (LP) para el promedio mensual en la NOM-001.

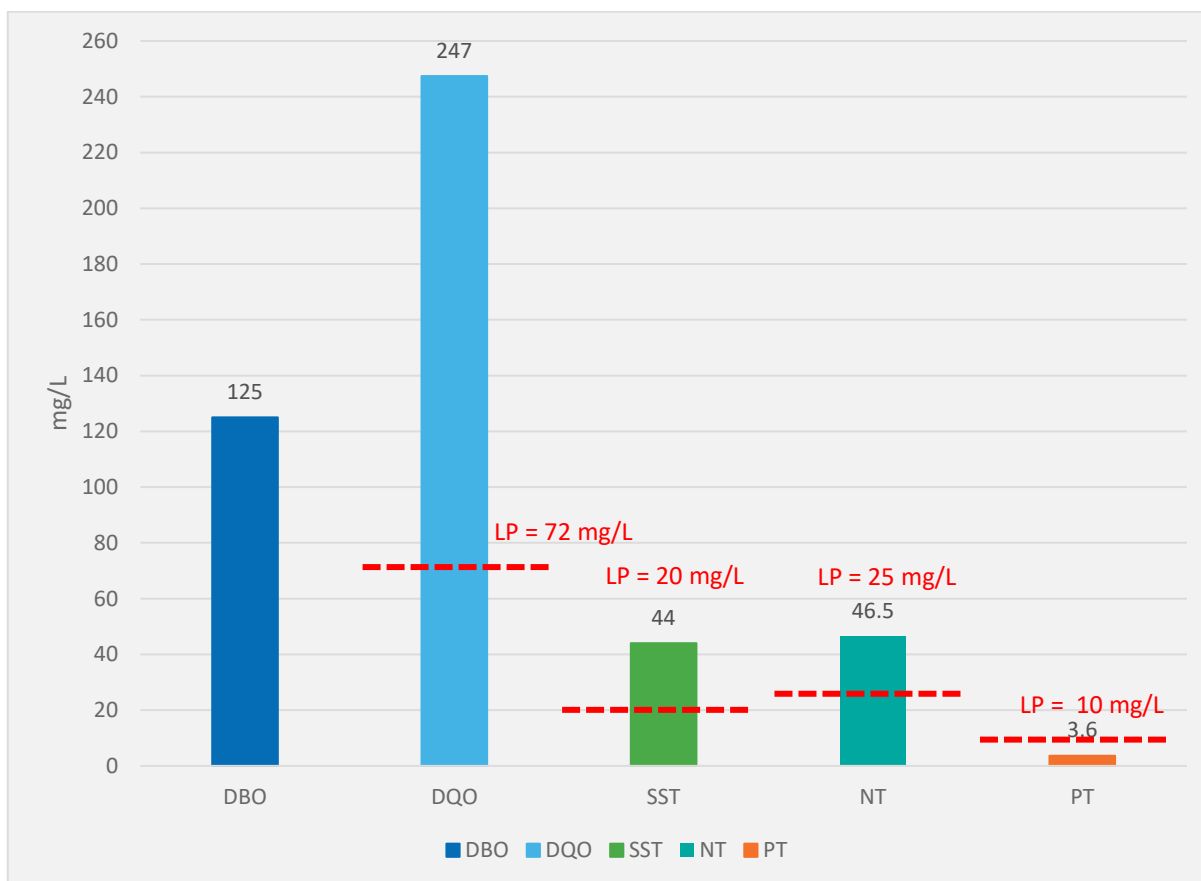


LP = Límite permisible

Figura 17 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)

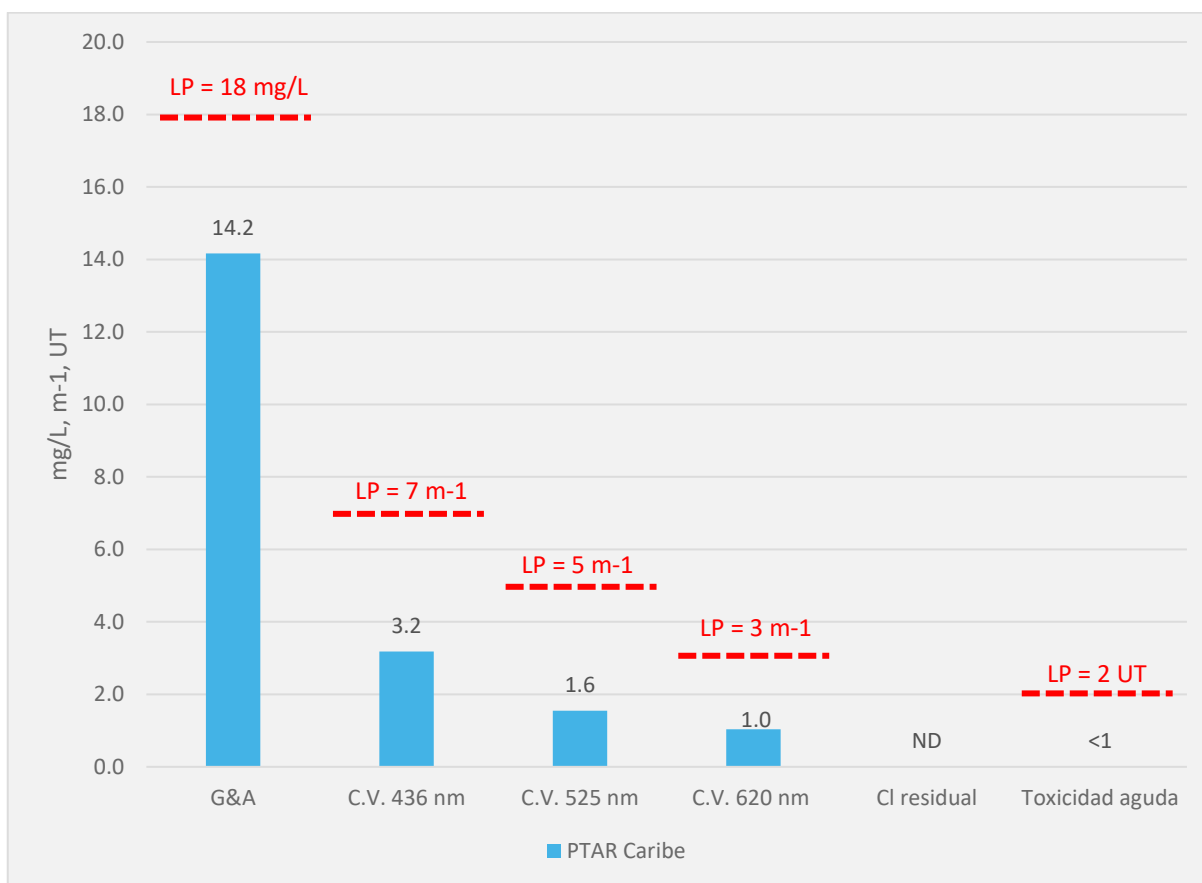
Calidad de agua tratada, de este Estudio

En la siguientes figuras y tabla se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada de la PTAR Caribe, en estas se indican los límites permisibles para el promedio diario en la NOM-001-2021.



LP = Límite permisible

Figura 18 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 19 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)

Tabla 12:
Caracterización del agua tratada de este Estudio (*E.coli* y Huevos de helminto)

		PTAR Caribe	Límite permisible NOM-001-2021
E.coli	NMP/100 mL	>2'400,000	100
Huevos de helminto	HH/L	1	1

Con la información histórica de calidad de agua tratada proporcionada por Aguakan y los resultados de los análisis efectuados se efectuó el análisis del cumplimiento de los principales parámetros de calidad del agua con respecto a la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021, para los valores de los datos históricos se utilizó el límite permisible del valor promedio mensual y para los resultados de los muestreos efectuados en este estudio se utilizó el límite permisible del valor promedio diario.

Tabla 13:
Cumplimiento del agua tratada

Parámetro	Valor promedio histórico (2020-2021) (mg/L)	Valor Estudio 2022 (mg/L)	Límite permisible NOM-001-2021	Cumple
SST	107	44	PM = 20 (mg/L) PD = 24 (mg/L)	NO
DQO	323	247	PM = 60 (mg/L) PD = 72 (mg/L)	NO
Nitrógeno total	58.3	46.5	PM = 15 (mg/L) PD = 25 (mg/L)	NO
Fósforo total	5.0	3.6	PM = 5 (mg/L) PD = 10 (mg/L)	SI

PM= promedio mensual, PD = promedio diario.

Como se observa en la tabla anterior de los parámetros básicos el único que cumple con la NOM-001-2021 es el fósforo, esto se debe a que la precipitación con químicos incrementa su remoción.

Con respecto al color verdadero en las tres longitudes de onda y la toxicidad aguda se obtuvieron valores dentro del límite permisible, la concentración de *E. Coli* estuvo por encima del límite permisible.

Parámetros de operación del reactor de lodos activados

Como parte de los trabajos de caracterización del agua cruda y tratada de la PTAR, también se incluyó la medición de los parámetros de operación de los reactores de lodos activados, oxígeno disuelto (OD) y sólidos sedimentables (SS).

El oxígeno disuelto se analizó en campo con un equipo portátil de la marca Hach. Los datos obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 14:
Oxígeno disuelto en reactor de lodos activados de la PTAR Caribe

Reactor	Oxígeno disuelto (mg/L)
R1	0.24
R2	0.16
R3	0.15

El valor promedio de OD en los reactores es de 0.18 mg/L, el rango típico de operación es de 1 a 3 mg/L (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014), por lo cual se considera insuficiente.

Para determinar la concentración de SS en los reactores de la PTAR Caribe se efectuó una prueba de sedimentabilidad utilizando tres buretas, se tomó una muestra del licor mezclado de cada uno de los reactores y se dejó sedimentar por un tiempo de 30 minutos (ver Figura 20).

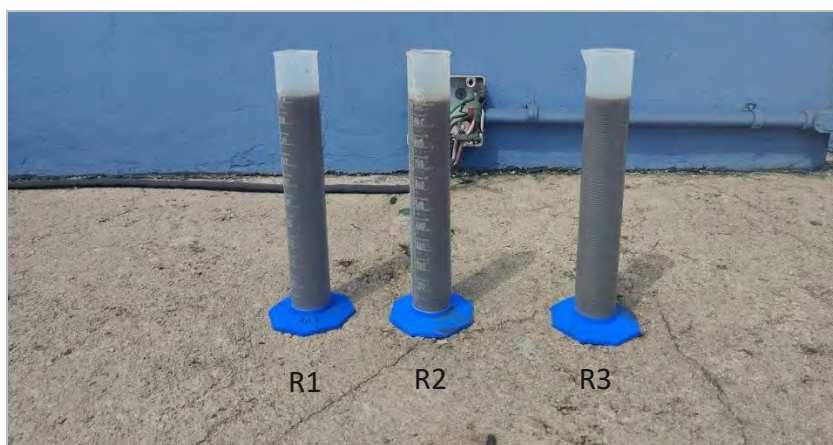


Figura 20 Pruebas de sedimentabilidad PTAR Caribe

El valor promedio resultante de SS en los tres reactores fue de 1,000 mL/L, con un índice volumétrico típico de 120 mL/g equivalen a 8.3 g/L, que es un valor muy alto, el rango típico para este tipo de reactores es de 3 a 4 g/L (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014). Esta sobre carga puede deberse al déficit de tratamiento que se tiene en el tren de lodo que limita las purgas de lodo.

Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua

Como parte de las actividades realizadas en campo, se registraron las coordenadas de los pozos de infiltración de cada PTAR, utilizando un equipo GPS map 60Cx marca Garmin. En la Tabla 15 se presentan las coordenadas de localización de los seis pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR Caribe. Posteriormente, en la Figura 21 se presentan fotografías correspondientes al levantamiento de las coordenadas con GPS y de los registros o brocales de los pozos de infiltración.

Tabla 15:
Coordenada de pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR

No. de pozo	Coordenadas Latitud	Coordenadas Longitud
1	21.13865	-86.857015
2	21.138709	-86.857028
3	21.13871	-86.856855
4	21.138899	-86.856821
5	21.139025	-86.856998
6	21.139488	-86.857231



Figura 21 Pozos de infiltración PTAR Caribe

Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR

Pendiente de incorporar, no se ha recibido la información por parte de Aguakan.

Costos de operación y mantenimiento (O & M) reportados por el Organismo Operador

De acuerdo a la información proporcionada por Aguakan, el costo total de O & M de la PTAR Caribe en el año 2021 fue de 16.27 millones de pesos (mdp's), desagregado de la siguiente forma:

- + Costo de operación: 13.12 mdp's
- + Costo de mantenimiento: 3.15 mdp's

Considerando que el caudal medio de agua tratada en el año 2021 fue de 132 L/s, que representan un volumen anual de 4,162,752 m³, el costo unitario de O & M de la PTAR fue de 3.91 \$/m³ de agua tratada.

En relación a la energía eléctrica consumida en el proceso de tratamiento, la información proporcionada indica los siguientes valores anuales:

- + Consumo anual de energía: 1,989,732 kWh
- + Costo anual: \$ 4,656,511

A partir de los valores previos se calcularon los siguientes indicadores:

- + Costo unitario de la energía. 2.34 \$/kWh
- + Consumo unitario de energía: 0.48 kWh/m³
- + Costo energía respecto al costo O & M: 29 %

En la información de costo total de O & M, así como en el consumo y costo de energía eléctrica se debe tener en cuenta que el agua efluente del TPQ no ingresa a tratamiento secundario aunque tiene el costo de los productos químicos dosificados y mayor consumo de cloro), y que el agua tratada de la PTAR Caribe no cumple con la calidad establecida en la NOM-001 previa y actual.

Estimación de los costos de operación y mantenimiento

A efecto de comparar el costo de operación reportado por Aguakan contra un costo de referencia se procedió a estimar los costos anuales de un grupo de insumos relevantes:

- + Energía eléctrica,
- + Cloro para desinfección,
- + Polímero para espesado y/o desaguado de lodo,
- + Acarreo de lodo desaguado, y
- + Análisis de laboratorio de agua tratada y lodo para cumplimiento normativo y control de proceso
- + Personal de O & M

Para lo anterior, con base en un caudal medio de 132 L/s (100 L/s a tratamiento biológico y 32 L/s a tratamiento primario con químicos) y la información de caudal y calidad de agua cruda y tratada proporcionada por el Organismo Operador se efectuó un balance de materia simplificado para establecer la masa de DBO removida, la generación de lodos en el tratamiento del agua, la remoción de sólidos suspendidos volátiles en el proceso de digestión y la masa de lodo desaguado a disposición.

Una vez definidos en el balance de materia los valores requeridos, a partir del caudal y calidad del agua cruda influente a la planta, se procedió a aplicar los factores de dosificación o consumo de los principales insumos (energía eléctrica, cloro polímero para espesado y/o polímero para desaguado) con base en las prácticas adecuadas de operación y, en el caso de los análisis de laboratorio de agua tratada y lodos, a partir de los requerimientos normativos.

En la Tabla 16 se presentan las consideraciones aplicadas para establecer el consumo de los insumos arriba indicados, así como el costo unitario asignado:

Tabla 16:
Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Energía eléctrica	Caudal medio de agua tratada y concentración promedio de DBO	2.18 kWh/kgDBO	2.50 \$/kWh
Productos químicos	Caudal medio de agua cruda al TPQ	25 ppm de sulfato de	6.0 \$/kg (41%

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
en el TPQ		aluminio, 1.5 ppm de polímero aniónico	agente activo) 150 \$/kg
Cloro	Caudal medio de agua tratada	6.0 mg/L Dosis mayor debido a efluente de TPQ	20 \$/kg
Polímero espesado	para Producción de lodo con base en caudal medio y concentración promedio de DBO y SST	4.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Polímero desaguado	para Fracción volátil del 75 % del lodo producido y remoción del 40 % de SSV en digestor	7.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Acarreo desaguado, húmeda	lodo base Lodo desaguado al 20 % de sólidos Masa de lodo en base seca/0.20	Ton de lodo en base húmeda	150 \$/ton
Análisis laboratorio Agua tratada	NOM-001 población > 50 mil habitantes	2 muestreos/mes	8,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Lodo / biosólidos	NOM-004 hasta 1,500 ton/año (base seca)	1 muestreos/año	10,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Control de proceso	---	1 lote por mes	6,000 \$/mes

El costo del mantenimiento preventivo de la PTAR y los consumibles asociados a esa actividad se estimó aplicando el criterio de destinar un importe anual equivalente al 0.85 % del costo de inversión de la planta con sus actuales características. El costo de la planta se estableció a partir de un costo base de 750 mil pesos por litro – segundo de capacidad media instalada.

Para establecer el costo del personal de operación y mantenimiento se considera una plantilla “tipo” de doce personas, misma que se desagrega en las siguientes plazas: 1 Jefe de planta, 2 Supervisores de operación/mantenimiento, 5 operadores y 4 auxiliares de operación o mantenimiento.

Los sueldos considerados para establecer este rubro de costo están en el rango de 28,000 pesos mensuales para el Jefe de planta y de 12,000 pesos por mes para el auxiliar de operación, los sueldos del resto del personal están comprendidos dentro de este rango.

Los sueldos nominales se afectaron por un factor de 1.50 para incorporar el costo de las diversas prestaciones y seguridad social del personal. De esta forma se determinó un costo total mensual de \$ 306, 000 por concepto de personal.

El factor unitario de consumo de energía eléctrica asignado permite establecer, además de la energía consumida por la planta, otros dos indicadores que en la PTAR Caribe tienen el siguiente valor:

- + Consumo unitario de energía: 0.66 kWh/m³
- + Potencia media de operación: 598 kilowatts

En la Tabla 17 se presentan los consumos e importes anuales de los rubros de costo establecidos, así como el costo unitario de cada rubro, al dividir su importe anual entre el volumen de agua tratada. Posteriormente, en la Figura se presenta de manera grafica el costo unitario desagregado por insumo.

Tabla 17:
Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M

Insumo	Consumo anual	Importe anual \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Energía eléctrica	2,093,789	5,234,471	1.26
Cloro	18,922	378,432	0.09
Productos químicos TPQ	---	605,491	0.15
Polímero para espesado	5,439	815,899	0.20
Polímero para desaguado	7,615	1,142,259	0.27
Acarreo lodo desaguado	4,759	713,912	0.17
Análisis laboratorio	---	274,000	0.07

Insumo	Consumo anual	Importe anual \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Mantenimiento	---	1,434,375	0.34
Personal de O & M	--	3,672,000	0.88
Total		14,270,840	3.43

Energía eléctrica consumo anual expresado en KWH; cloro, polímero para espesado y polímero para desaguado, en kg; acarreo de lodo, en toneladas.

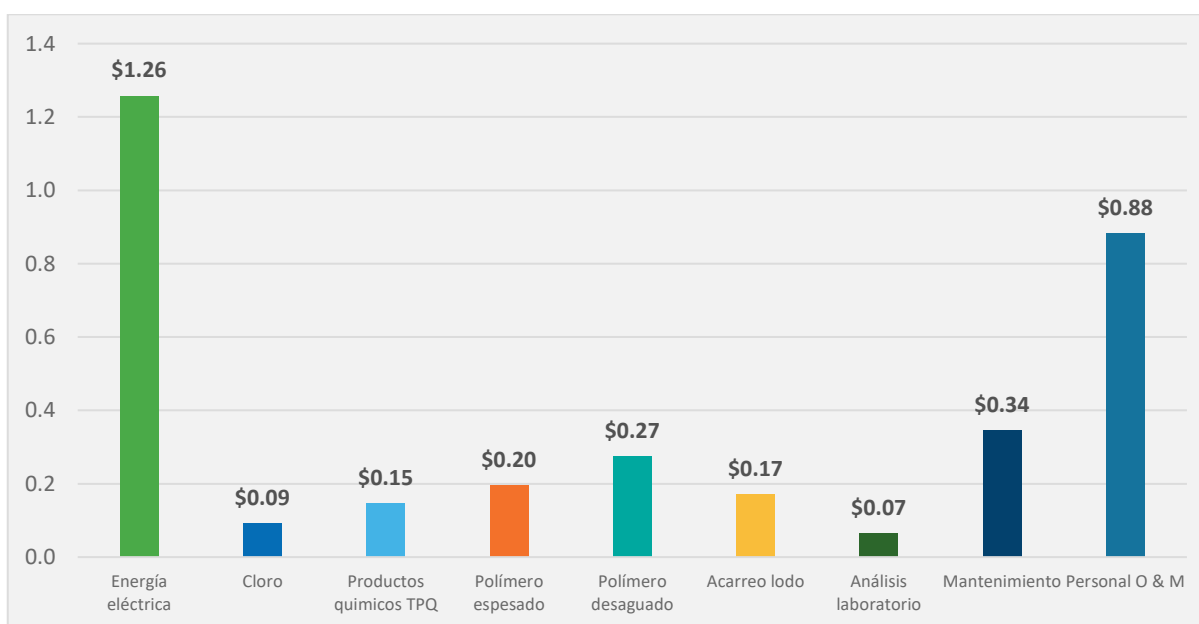


Figura 22 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m³

El importe anual de operación y mantenimiento estimado en esta sección es de 14.27 millones de pesos, con un costo unitario de O & M de 3.43 \$/m³ de agua tratada

Al comparar el importe estimado anual de O & M con el importe reportado por Aguakan, de 16.3 millones de pesos, se tienen 2.0 mdp's en el costo estimado por abajo del costo reportado, que representa $\approx -12\%$. La diferencia de costos se considera dentro de un margen razonable, dados los criterios y premisas generales con las que se estimó el costo de O & M de la planta.

Por lo antes expuesto, se considera que el costo de O & M reportado por Aguakan es adecuado, y que se destinan suficientes recursos económicos y materiales, lo que se refleja las condiciones de operación y mantenimiento observadas en las visitas efectuadas a la planta Caribe, así como en la evaluación del agua tratada producida.

La calidad de regular a mala del agua tratada es producto en gran medida de la obsolescencia de los procesos de tratamiento de agua y lodo, y de los equipos de la planta, aunado a la carencia de algunos equipos. Adicional a lo anterior, el efluente del TPQ impacta de manera negativa la calidad del efluente general.

Observaciones y recomendaciones generales

A continuación se presentan las observaciones y recomendaciones que se desprenden de la evaluación de la información proporcionada por Aguakan y del diagnóstico en campo y gabinete de la PTAR Caribe:

1. Dadas las condiciones de deterioro que presenta el tren de tratamiento fisicoquímico, sus altos costos de operación, aunado a que no cumple con el desempeño requerido para la nueva NOM-001, se recomienda dismantelar este tren por completo y sustituirlo por un tren biológico con remoción de nutrientes, acorde con el tren de tratamiento futuro considerado por Aguakan con pretratamiento de operación automática.
2. Por el tiempo de operación y tipo de tecnología se recomienda renovar el tren de tratamiento biológico.
3. Los futuros reactores y clarificadores se deberán diseñar con profundidad útil mayor que la del actual.
4. El reactor debe tener aireación difusa y sopladores turbo con el fin de mejorar la eficiencia energética y la transferencia de oxígeno en el proceso de lodos activados.
5. Se recomienda evaluar la pertinencia de incorporar una etapa anaerobia de alta carga en lugar del sedimentador primario del tren futuro, y en este mismo efectuar la estabilización de los lodos secundarios. Esto evitaría el acarreo de los lodos a la PTAR Sur, además de menor generación de lodo y, por consiguiente, menor consumo de polímero y costo de acarreo y disposición.
6. En caso de mantener el proceso de sedimentación primaria para el tren futuro y no realizar la estabilización de lodo dentro de la PTAR Caribe, se recomienda evaluar la conveniencia de enviar de manera líquida el lodo crudo a la PTAR Sur para su estabilización.
7. Mantener en operación la central de cloración como respaldo de la desinfección UV futura y/o complemento para añadir cloro residual en el agua para reúso.
8. Incorporar filtración terciara en el nuevo tren de tratamiento, ya que la planta se localiza en un área urbana con alto potencial para aprovechar el agua en riego de áreas verdes.
9. Incorporar la operación de espesado de lodo.
10. Dado el deterioro que presenta la caseta de desaguado se recomienda construir una nueva para las operaciones de espesado y desaguado, además de sustituir el filtro banda o comprar un equipo nuevo de otra tecnología.



2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Aguakan cuenta con proyecto ejecutivo elaborado en 2020, recientemente concluyó la actualización del proyecto acorde a los objetivos de calidad de agua tratada de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el proyecto ejecutivo se establece que los lodos de la PTAR Caribe serán espesados y desaguados, sin estabilizar, para transportarse a la PTAR Sur para efectuar su manejo y estabilización conjunta.

La Dirección de Aguakan informó que en el primer trimestre de 2023 se licitará la construcción un módulo de tratamiento de agua con capacidad para 225 litros por segundo, mismo que sustituirá a la planta actual, con excepción del tanque de contacto de cloro y la caseta de cloración.

En la Tabla 18 se presenta el resumen de las acciones propuestas para que la planta pueda cumplir con las especificaciones y límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para las descargas a suelo cárstico.

Tabla 18:
Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Caribe

Etapas de Tratamiento		Caribe
TREN DE AGUA		
Pretratamiento mecánico		Existente, se sustituye
Regulación	agua	Cárcamo de agua cruda existente, se sustituye

Etapa de Tratamiento	Caribe
cruda/pretratada	
Sedimentación primaria	Primario con químicos, se decomisiona Se incorpora primario convencional
Filtro biológico	No aplica
Biológico remoción DBO	Existente, se sustituye Clarificación secundaria existente, se sustituye
Biológico remoción de fósforo	Se incorpora
Biológico remoción nitrógeno	Se incorpora
Filtración terciaria	Futuro, en caso de reúso de agua tratada
Desinfección	Cloro gas, existente (UV a mediano plazo)
TREN DE LODO	
Espesado	Se incorpora
Digestión aerobia	Se decomisiona
Digestión anaerobia	Lodo espesado/desaguado crudo se envía a Sur
Desaguado	Existente (se sustituye)

En la Tabla 19 se presenta la descripción y características de las acciones propuestas de rehabilitación, mejoramiento o incorporación de etapas y/o equipos para la PTAR Caribe.

Tabla 19:
Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Caribe

Etapa de tratamiento	Caribe
TREN DE AGUA	Descripción del tren establecido en el Proyecto Ejecutivo

Etapa de tratamiento	Caribe
Pretratamiento	1. Cribado grueso, cribado fino, y desarenación vórtice; prensa de sólidos y clasificador de arena;
Tratamiento Primario	2. Sedimentación primaria de alta tasa • Con by pass de agua pretratada al reactor
Tratamiento Secundario	1. Reactor tipo A2O con secciones anaerobia, anóxica y aerobia, para remoción biológica de nitrógeno y fósforo. 2. Sopladores tipo turbo
Clarificación Secundaria	1. Clarificación secundaria
Tratamiento Terciario	1. Filtración terciaria, en caso de reúso de agua tratada.
Desinfección	1. Se utiliza la caseta de cloración y el tanque de contacto de cloro existentes • El proyecto considera a mediano plazo instalar sistema de desinfección ultravioleta
TREN DE LODO	Descripción del tren establecido en el Proyecto Ejecutivo
Espesamiento de lodos	1. Espesador gravitacional de lodo primario 2. Mesa espesadora para purga de lodo secundario o efectuar coespesamiento en sedimentador primario
Digestión de lodos	1. No aplica, el lodo se envía a PTAR Sur
Desaguado de lodos	1. Desaguado en centrífugas, el lodo desaguado se transporta en góndolas a la PTAR Sur
Secado adicional de lodo desaguado	1. Actualmente se envían al patio de PTAR Norponiente

Etapa de tratamiento	Caribe
TEMAS VARIOS	1. Incluye medición de flujo en las corrientes de agua y lodo. 2. Incluye sensores para el control de proceso, enfocados a la eficiencia energética, ahorro de reactivos y control de la calidad del agua tratada • Incluye variadores de frecuencia para los principales equipos de la PTAR. 3. Complementar la capacidad de la batería de pozos de infiltración de agua tratada, con capacidad para caudal máximo horario

En la Figura 23 se presenta el diagrama de flujo del tren de tratamiento de agua y lodos de la PTAR Caribe incorporando las acciones propuestas para que la planta produzca agua tratada que cumpla con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas a suelo cárstico.

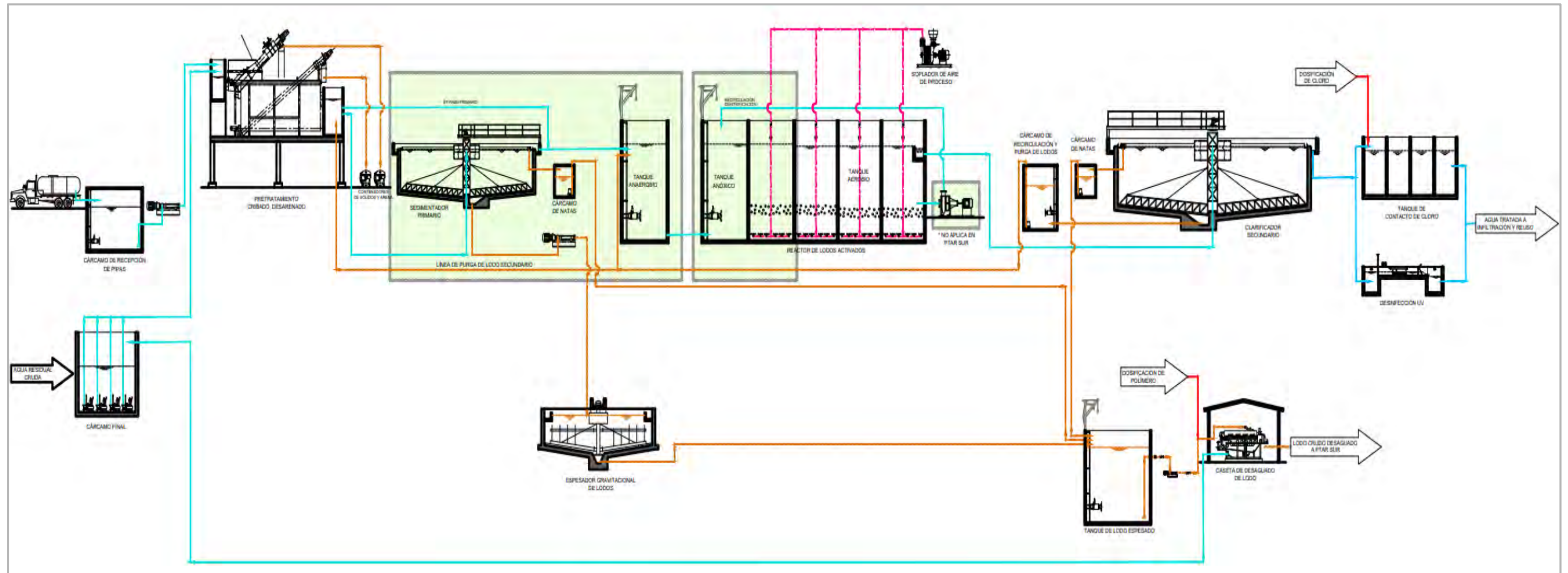


Figura 23 Diagrama de flujo de la PTAR Caribe con las acciones propuestas

A decorative graphic consisting of three wavy, horizontal lines in blue, green, and grey, located on the left side of the page above the title.

3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el procedimiento realizado para la estimación de costos de las acciones necesarias por ejecutar para que la PTAR Caribe cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; en dicho presupuesto se incluye el costo de obra civil, electromecánica, eléctrica, instrumentación y control para obra nueva o ampliaciones, rehabilitación de obras existentes y proyecto ejecutivo y supervisión de obra y proyecto ejecutivo.

Las acciones de mejora surgen de la visita y diagnóstico técnico que se presenta previamente, así como de las entrevistas e información recabada con las áreas responsables de la operación y gestión de los recursos para saneamiento.

Techo financiero

El techo financiero para la implementación de las acciones de mejora y rehabilitación de la PTAR, se realizó a partir de costos paramétricos, como lo indican los Términos de Referencia.

Para lo anterior se recurrió a costos base de unidades de proceso y equipamiento similares y de capacidad comparable con las necesidades de las PTAR que forman parte de este estudio, de igual manera dichos costos son ajustados de acuerdo a la capacidad necesaria.

En la Tabla 20 se muestran los costos base por unidad de proceso, los cuales corresponden al costo de mercado establecido en proyectos realizados en el año 2021 y 2022 en Quintana Roo, en plantas de tratamiento con proceso de remoción biológica de nitrógeno y fósforo, así como

equipamiento electromecánico y de proceso, tanto de tipo convencional como relativamente nuevo en la región, como es la filtración terciaria y la desinfección con lámparas ultravioleta.

Tabla 20:

Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio

Unidad de proceso	Costo base en MDP
TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	20.97
Regulación agua cruda/pretratada	12.65
Sedimentación primaria	13.12
Caja distribuidora agua primaria	0.99
Filtro biológico	
Biológico remoción DBO	22.99
Biológico remoción de fósforo	2.50
Biológico remoción nitrógeno	5.75
Clarificación secundaria	14.80
Recirculación y purga de lodo	6.89
Filtración terciaria	12.12
Desinfección	10.49
Pozo de infiltración	1.60
TREN DE TRATAMIENTO DE LODOS	
Espesado de lodo	7.79
Digestión aerobia	16.09
Digestión anaerobia	59.55
Tanque de lodo digerido	3.77

Unidad de proceso	Costo base
	en MDP
Desaguado de lodo	17.43
Cogeneración	18.81

Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con las acciones a realizar en la PTAR se estimaron los costos de inversión, esto de acuerdo con los costos base y el factor de ajuste, los cuales están relacionado con el caudal de tratamiento.

A continuación se describe el procedimiento aplicado a cada planta de tratamiento (identificada como PTAR "n") para establecer el techo financiero preliminar de los recursos económicos requeridos para implementar el plan de acciones:

1. Los costos de referencia de las unidades de proceso se ajustaron a valores de noviembre de 2022 con el factor de actualización que resulta de dividir el INPC de noviembre entre el INPC del mes en que se originó el presupuesto.

A manera de ejemplo, a continuación se describe el procedimiento:

- Fecha del presupuesto de la unidad de proceso o PTAR de referencia: octubre de 2021.

- Valor del INPC en octubre de 2021: 115.561

- Valor del INPC de noviembre de 2022: 125.997

- Factor de actualización costo de referencia: $125.997/115.561 = 1.090$

2. El costo de referencia del proceso de digestión anaerobia y del sistema de cogeneración se determina con base en un digestor anaerobio con sistemas periféricos; tamizado de lodo, tratamiento lateral de la corriente de desaguado de lodo anaerobio; antorcha de quemado de biogás, gasómetro para almacenar el biogás generado, acondicionamiento de biogás; caseta de equipos de digestión y sistema de cogeneración.

En la siguiente tabla se presenta el desglose y capacidad de los componentes de las etapas de digestión anaerobia de lodos y del sistema de cogeneración:

Etapa de Digestión Anaerobia de Lodo

Concepto	Importe actualizado, mdp
Tamizado de lodo (capacidad para 5 L/s de lodo espesado al 5%)	1.22
Digestor anaerobio mesofílico (de 5 700 m ³)	43.25
Gasómetro de membrana y periféricos (de 1.000 m ³)	6.14
Quemador de biogás y periféricos (capacidad para 225 m ³ /h)	1.59
Edificios operativos	2.71
Tratamiento lateral del agua retirada en desaguado de lodo	4.64
Subtotal	59.55
Obra eléctrica (12 % del subtotal)	7.44
Control (3 % del subtotal + obra eléctrica)	2.01
Contingencias (8 % del subtotal + obra eléctrica + control)	5.52
Total	74.53

Sistema de Cogeneración

Concepto	Importe actualizado, mdp
Sistema de tratamiento de biogás (capacidad para 225 m ³ /h) para remoción de humedad, impurezas y H ₂ S	7.10
Sistema integral de cogeneración (capacidad de 500 kW eléctricos)	11.72
Total	18.81

El costo actualizado de las unidades de proceso se ajustó posteriormente en función de la capacidad (a caudal medio) de las unidades de proceso de la PTAR "n", en relación con la capacidad de la PTAR de referencia, acorde a lo siguiente:

$$\text{Costo PTAR "n"} = \text{Costo PTAR de referencia} * ((\text{Tamaño PTAR "n"} / \text{Tamaño PTAR referencia})^{0.70})$$

La capacidad de la PTAR de referencia es para un caudal promedio de 150 L/s.

A manera de ejemplo, al utilizar la ecuación anterior, y considerando que la PTAR "n" es de 350 L/s de capacidad, se obtiene un multiplicador de 1.81, mismo que se aplica sobre el importe de las unidades de proceso de la PTAR de referencia.

De esta forma, en lugar de ajustar el costo de la PTAR "n" con una relación lineal entre el tamaño de ambas plantas (2.33), el criterio toma en cuenta que el costo unitario de inversión (\$ por L/s de capacidad) disminuye al aumentar el tamaño de la unidad de proceso y/o de la PTAR.

Este procedimiento de ajuste de costo se utilizó en las unidades de proceso cuyo dimensionamiento está determinado por la capacidad y carga hidráulica, como es el caso de las etapas que a continuación se indican:

- Pretratamiento (cribado y desarenación)
- Regulación y/o bombeo de agua cruda/pretratada
- Sedimentación primaria
- Caja distribuidora agua primaria
- Clarificación secundaria
- Recirculación y purga de lodo
- Filtración terciaria
- Desinfección
- Tanque de lodo digerido

Asimismo, el procedimiento de ajuste de costo descrito en este numeral también es aplicable en los procesos biológicos de tratamiento de agua y en las operaciones y procesos del tren de tratamiento de lodos, cuando en la PTAR "n" se presenta la condición de carga influente orgánica y de sólidos que se describe en el siguiente numeral.

3. El factor de ponderación arriba referido se utiliza de manera directa si la carga contaminante influente a la PTAR "n", expresada como la concentración promedio de la DBO y SST en el agua residual cruda, es comparable a la de ($\leq 20\%$) la PTAR de referencia.

La concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente a la PTAR de referencia es 350 mg/L.

Se considera que el agua residual influente a la PTAR "n" es comparable al agua residual de la PTAR de referencia, cuando la concentración promedio de DBO y SST está en el rango de $\pm 20\%$ a la concentración indicada en el párrafo previo.

4. A continuación se enlistan las operaciones y procesos del tren de tratamiento de agua y de lodos que, en caso de variación mayor al 20 % en la concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente, estarían sujetos a ajuste de costo adicional al ya aplicado en el numeral 3.
 - Filtro rociador

- Reactor de lodos activados, remoción DBO
- Reactor de lodos activados, remoción de fosforo
- Reactor de lodos activados, remoción nitrógeno
- Espesado de lodo
- Digestión aerobia
- Digestión anaerobia
- Desaguado de lodo

En los casos en que la calidad del agua residual influente a la PTAR "n" tiene una variación superior al 20%, hacia arriba o hacia abajo, se procedió a aplicar un ajuste adicional al costo de inversión en las operaciones y procesos del listado inmediato previo.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual influente es $\approx 30\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.05 o 0.90, según corresponda.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual es $\approx 40\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.12 o 0.80, según corresponda.

5. Se aplicó un factor de ponderación para los casos en que la actividad propuesta no es una unidad de proceso nueva y completa, es decir que consiste en la rehabilitación, mejoramiento o complemento de capacidad de una etapa de proceso o unidad existente.

El valor del factor de ponderación asignado en estos casos está en el rango de 0.35 a 0.65, a criterio del especialista, en función del grado de intervención que se requiere para la unidad de proceso en cuestión.

En términos generales, los valores cercanos al límite inferior del rango se aplicaron cuando la acción implicaba rehabilitación civil única o principalmente; los valores cercanos al límite superior se aplicaron cuando la intervención implica también reequipamiento electromecánico.

6. Una vez establecido el importe de inversión por planta de las principales unidades del tren de tratamiento de agua y de lodos, para determinar el importe de otros componentes de la PTAR a dicho importe se aplicó un valor seleccionado de los rangos de porcentaje que a continuación se indican:

Equipo menor:	5 % a 8 %
Vialidades, patios y obras exteriores:	1 % a 5 %
Obra eléctrica:	10 % a 15 %
Automatización y control:	3 % a 5 %

Imprevistos y contingencias:

8 % a 12 %

7. El importe por elaboración del proyecto ejecutivo de las acciones propuestas por planta se determinó a partir de un porcentaje, en el rango del 1.2 % al 3.5 %, mismo que se aplicó sobre el importe total estimado.
8. El costo de la supervisión de la ejecución y puesta en marcha de las obras y equipamiento propuestas en el Plan de Acciones por planta, se estableció aplicando un porcentaje del 3.5 % sobre el importe total estimado, sin incluir los importes correspondientes al costo del proyecto ejecutivo y de capacitación.

Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares

La selección de la digestión anaerobia como proceso de tratamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, orientado a la generación de biogás para su aprovechamiento, o bien la opción de instalar paneles solares en estas plantas, ha sido justificada mediante criterios técnicos específicos. Estos criterios incluyen la capacidad operativa de las plantas, la disponibilidad de espacio físico y las propiedades de la carga orgánica influente. En particular, en el caso de las PTAR ubicadas en el Estado de Quintana Roo, el contexto local en que se encuentra cada planta cobra especial relevancia, dado que las condiciones geográficas, ambientales y de infraestructura turística pueden influir en la viabilidad y eficiencia de cada tecnología implementada.

Este análisis permite una decisión fundamentada, buscando optimizar tanto el rendimiento energético como el aprovechamiento sostenible de los recursos locales.

Antecedentes

Como parte del diagnóstico para el mejoramiento de las PTAR de Quintana Roo mayores a 100 L/s, la digestión anaerobia se considera en las siguientes PTAR:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur que recibe también los lodos de la PTAR Caribe
4. PTAR Saas Tun Ha (a futuro, mediano plazo)

Adicionalmente, la instalación de paneles solares se considera en las siguientes PTAR, de las cuales las primeras tres son instalaciones existentes:

1. PTAR Norte

2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur
4. PTAR El Rey
5. PTAR Saas Tun Ha
6. PTAR San Miguelito
7. PTAR Bicentenario
8. PTAR Centenario

Digestión Anaerobia y Cogeneración

La digestión anaerobia es un proceso biológico mediante el cual los lodos residuales se descomponen en ausencia de oxígeno, generando biogás. El biogás, compuesto principalmente de metano, puede ser aprovechado para producir electricidad y calor mediante sistemas de cogeneración. Además de reducir el volumen de lodos, la digestión anaerobia permite un manejo más eficiente de los residuos, mejorando la sostenibilidad de las plantas al aprovechar el potencial energético del metano.

Los principales aspectos considerados para proponer digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás en las PTAR se presentan en seguida. Todos fueron considerados en conjunto para cada planta.

Condiciones climáticas

La temperatura está relacionada con la velocidad de las reacciones químicas. En el diseño de la digestión anaerobia, la temperatura aumenta la velocidad de hidrólisis y de formación de metano, además disminuye el mínimo tiempo de retención requerido para llegar a una destrucción de sólidos aceptable (38 % en SSV).

Para un proceso mesofílico, que es el seleccionado para las PTAR de Quintana Roo, las temperaturas óptimas se encuentran entre los 30 y 38°C (Metcalf & Eddy, 2014), lo cual es fácilmente alcanzado en la región, con temperaturas de agua residual alrededor de los 30°C todo el año. El no requerir un sistema para control fino de la temperatura es una gran ventaja de toda la zona.

Carga orgánica influente

Se requiere mantener cierta carga orgánica para mantener el equilibrio entre los microorganismos que realizan la digestión anaerobia y mantener una producción de biogás constante. La carga orgánica alimentada al digestor proviene de la fracción de SSV en los lodos generados en el proceso primario y/o secundario y éstos a su vez dependen de las características del agua residual.

En general, la carga orgánica influente necesaria proviene de un análisis detallado del proceso para cada caso, sin embargo, existen lineamientos con reglas generales para anticipar este resultado. En el caso de las PTAR de Quintana Roo, se consideraron para digestión anaerobia

las PTAR que en su operación actual o a capacidad plena, recibieran más de 300 L/s o carga orgánica igual o mayor a 7.5 ton DBO/d, esto de acuerdo con estudios técnicos realizados previamente por GIZ (GIZ México, 2017).

Toxicidad

La digestión anaerobia es un proceso sensible a variaciones de pH y puede verse afectada por la presencia de ciertas sustancias inhibidoras en las aguas residuales. Para la instalación de una nueva PTAR, es fundamental realizar análisis previos para descartar la presencia de estos compuestos que puedan interferir en el proceso. En el presente caso, dado que las PTAR evaluadas ya están en operación, se ha verificado que en los sitios propuestos para la digestión anaerobia no se han registrado historiales de inhibiciones significativas al proceso biológico, lo que garantiza su viabilidad.

Volumen y tipo de lodos generados

Una de las principales ventajas de la digestión anaerobia es la generación de biogás, siendo más eficiente esta generación cuanto mayor es la carga orgánica en los sólidos alimentados. En los sitios propuestos, además de lodos secundarios, se procesan lodos primarios con alto contenido de SSV, lo que incrementa la generación de biogás. Las altas cargas orgánicas influentes a las plantas aseguran buena generación de sólidos, maximizando la eficiencia del sistema de digestión.

Disponibilidad de espacio

Los sitios con propuesta de digestión anaerobia fueron revisados para la disponibilidad de espacio para una unidad de digestión anaerobia junto con gasómetro e instalaciones de cogeneración y manejo de biogás.

Disponibilidad operativa

La digestión anaerobia es una unidad significativamente más compleja que las demás en el tren de tratamiento, lo que demanda mayor capacidad técnica y un personal operativo especializado para su correcta operación a lo largo de la vida útil de la PTAR. En las plantas propuestas, se considera que cuentan con el personal y la capacidad técnica necesarios para implementar y mantener este proceso de manera eficiente.

Viabilidad operativa

Con base en la calidad de agua, la temperatura, el caudal influente y el tipo de proceso, es posible estimar la cantidad de lodos producidos en cada PTAR. Los lodos producidos son la base para estimar el tamaño ideal del digestor anaerobio. De acuerdo con la literatura (Metcalf & Eddy, 2014) el tiempo de retención recomendado para los lodos a 30°C es de 6 a 14 días y la carga orgánica puede variar entre los 1.6 y 4.8 kg SSV/m³ d.

A manera de ejemplo, con el volumen de 5,700 m³/d y a una carga de 2.4 kg SSV/ m³ d sería

posible alimentar hasta 13.7 toneladas al día de lodo. Este flujo másico a una concentración de 3.5 % en sólidos tendría un tiempo de residencia de 14.6 días. La producción de lodo actual de las PTAR seleccionadas para digestión anaerobia varía entre 6.7 y 9.9 toneladas al día, y puede ser aún mayor de acuerdo con la capacidad de tratamiento de agua residual instalada. El volumen seleccionado considera este crecimiento además de las necesidades actuales.

Conclusiones para biogás y cogeneración

Los aspectos anteriores se analizaron y forman parte del análisis de costo presentado. En general en las PTAR seleccionadas es positiva la presencia de la digestión anaerobia. En resumen, para seleccionar las PTAR donde es viable instalar digestión anaerobia se consideró que:

1. La temperatura de la zona es favorable con 30°C.
2. La carga orgánica influente a las PTAR y/o el caudal se encuentran en el umbral de 7.5 ton/d de DBO o 300 L/s de caudal tratado.
3. Los procesos biológicos existentes no presentan obstáculos por sustancias inhibidoras.
4. La presencia de lodo primario favorece la producción de biogás.
5. Existe suficiente espacio para la instalación de las unidades respectivas.
6. Existe suficiente personal operativo y capacidad técnica para mantener la unidad funcionando eficientemente.
7. El volumen seleccionado como base para los costos cubre los rangos de operación actuales y futuros de cada PTAR.
8. En el balance económico, la producción y aprovechamiento del biogás es un instrumento importante para hacer viable la operación de las PTAR más grandes.

Generación de Energía Solar

A diferencia de la digestión anaerobia, la instalación de paneles solares es un proceso más sencillo y viable para prácticamente cualquier PTAR. El criterio principal para su implementación fue la disponibilidad de espacio en la planta y su tamaño, siendo seleccionadas aquellas de mediana o gran escala.

Las plantas que no tienen suficiente carga orgánica para justificar la digestión anaerobia, pero disponen de amplias áreas, pueden aprovechar los paneles solares para reducir su dependencia de la red eléctrica y generar energía renovable de manera sostenible. En consecuencia, esta tecnología se considera para casi todas las PTAR.

El costo de implementación de ambas tecnologías no es equivalente, siendo la digestión anaerobia considerablemente más costosa. Sin embargo, como se muestra en el análisis económico, la generación de biogás a escalas superiores al umbral establecido por la GIZ produce una cantidad significativa de energía eléctrica, generando importantes ahorros a largo plazo. Además, la digestión anaerobia requiere una mayor capacidad técnica para su operación. En contraste, los paneles solares, más sencillos de instalar y mantener, representan

una opción accesible y conveniente para todas las PTAR.

A continuación se presenta una tabla resumen con los principales criterios utilizados para la selección de digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás, así como para la instalación de paneles solares.

		Principales Criterios para selección de Digestión Anaerobia						Criterio de selección para la instalación de Paneles Solares	
Nombre de la planta	Capacidad instalada (L/s)	DBO entrada (mg/L)	Carga orgánica influente (Ton DBO /día)	Carga orgánica > 7.5 ton / día	Sedimentación primaria (Lodo primario)	Disponibilidad operativa	Digestión Anaerobia	Espacio disponible	Paneles solares
Caribe 2000	225	316	6.1	SI	SI	SI	SI	NO	NO

Resumen de inversión, techo financiero

En la Tabla 21 se muestra el monto de inversión por unidad de proceso o componente de proyecto, y en la Figura 24 se muestra su distribución porcentual.

Tabla 21:
Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Etapa o componente	Importe PTAR Caribe, mdp's
Proyecto ejecutivo	
Bombeo / regulación / pretratamiento / primario	59.19
Remoción DBO y nutrientes, desinfección	70.29
Tratamiento terciario	
Tren de tratamiento de lodos	38.50
Digestión anaerobia	
Cogeneración	
Paneles solares	
Equipo menor	8.40
Terracerías, vialidades, patios	8.40
Obra eléctrica	21.00

Etapa o componente	Importe PTAR Caribe, mdp's
Automatización y control	5.04
Imprevistos y contingencias	13.44
Supervisión	7.86
Capacitación	0.40
Total	232.52

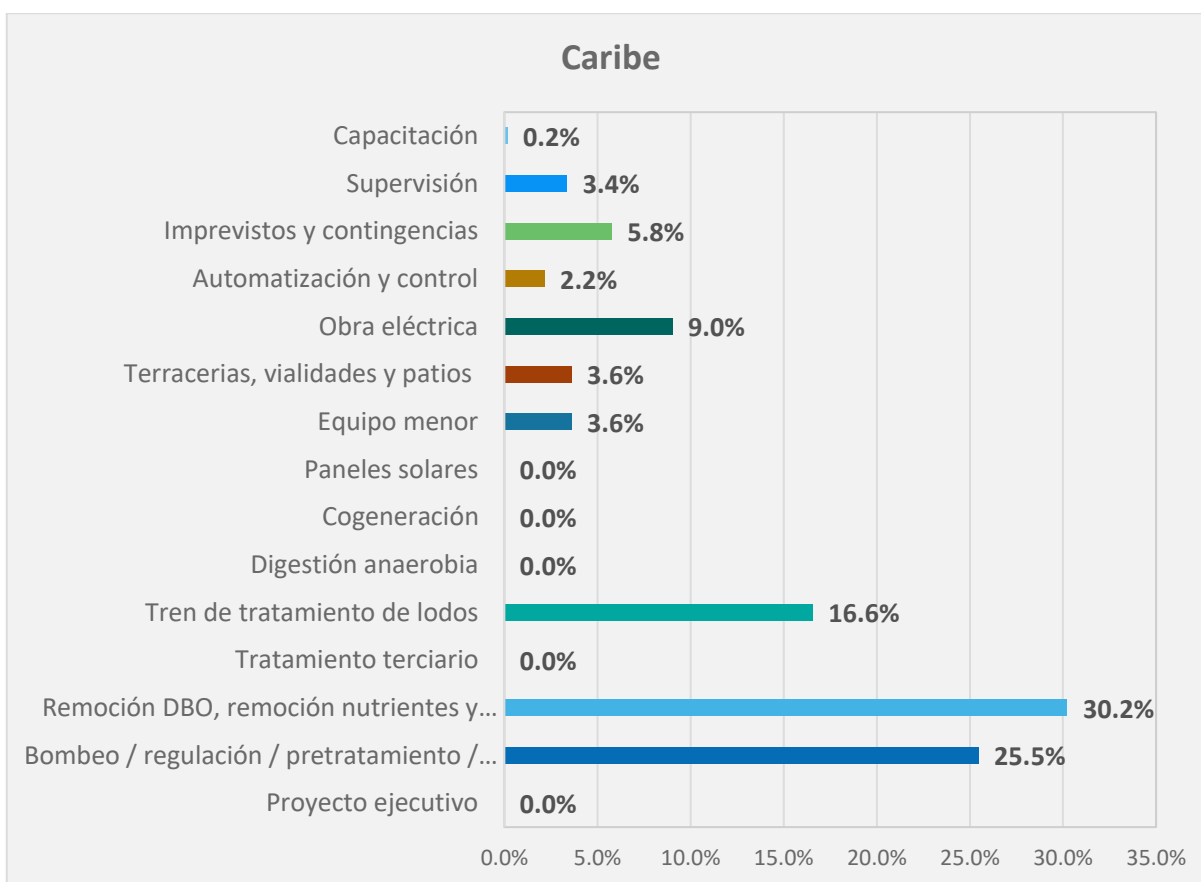


Figura 24 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

En la Tabla 22 se muestra el resumen del techo financiero total.

Tabla 22:
Monto de inversión, millones de pesos

PTAR	Capacidad instalada, L/s	Capacidad propuesta, L/s	Inversión requerida	Inversión Digestión Anaerobia	Inversión Cogeneración	Inversión Paneles solares	Inversión Total	Inversión unitaria, k\$/lps
Caribe 225	225	225	232.5	--	--	--	232.5	1,033

A continuación, se muestra la estimación detallada de costos, se describe la unidad de proceso, el factor de ajuste integrado y monto de inversión estimado, así como los porcentajes aplicados a las obras complementarias: vialidades, obra eléctrica, de control e instrumentación, imprevistos, proyecto ejecutivo, supervisión y capacitación.

Tabla 23:
Estimación detallada de costos PTAR Caribe

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tren de Tratamiento de Agua		
Pretratamiento mecánico	1.33	27.85
Regulación agua cruda/pretratada	1.00	12.60
Sedimentación primaria	1.33	17.43
Caja distribuidora agua primaria	1.33	1.31
Filtro biológico		
Biológico remoción DBO	1.33	30.53
Biológica remoción de fósforo	1.33	3.32
Biológico remoción nitrógeno	1.33	7.63
Clarificación secundaria	1.33	19.66
Recirculación y purga de lodo	1.33	9.15
Filtración terciaria		
Desinfección		
Pozos de infiltración		
Tren de Tratamiento de Lodos		
Espesado	1.33	10.34
Digestión aerobia		
Digestión anaerobia		
Tanque de lodo digerido	1.33	5.00

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Desagüado	1.33	23.15
Cogeneración		
Subtotal		167.98
Equipo menor	5.0%	8.40
Terracerías, vialidades y patios	5.0%	8.40
Obra eléctrica	12.5%	21.00
Automatización y control	3.0%	5.04
Imprevistos y contingencias	8.0%	13.44
Proyecto ejecutivo		
Supervisión		7.86
Capacitación		0.40
Total		232.52

A decorative graphic consisting of three wavy, horizontal lines in shades of green, blue, and grey, positioned above the main title.

4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el programa de inversiones necesarias por ejecutar para que la PTAR cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; este programa abarca del año 2023 al año 2027.

Este programa de inversiones es el resultado de las acciones propuestas para mejorar la calidad del agua tratada de las PTAR's con capacidad de tratamiento igual o mayor a 100 l/s en el estado de Quintana Roo, así como el presupuesto derivado del plan de acciones. La programación de las inversiones se basa en las necesidades propias de cada planta considerando el objetivo principal, que es el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

El 5 de diciembre de 2022 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación los:

LINEAMIENTOS que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Los Lineamientos constan en total de veintitrés artículos, más un artículo transitorio, así como el denominado Anexo A: Instructivo para la Información Requerida en el Sistema.

Los Lineamientos están estructurados en seis capítulos:

- + Capítulo Primero, Disposiciones Generales
- + Capítulo Segundo, Requisitos para la Presentación y Registro de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Tercero, De los Plazos de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Cuarto, Procedimiento para la presentación, registro y revisión de los Programas para el Cumplimiento, así como del Informe de Avances
- + Capítulo Quinto, De las Verificaciones
- + Capítulo Sexto, De las Sanciones

Aspectos Clave de los Lineamientos

Artículo 2. Sujeto Regulado: El responsable de descargas de aguas residuales al que resulte aplicable la NOM-001-SEMARNAT-2021, quien podrá presentar sus Programas para el Cumplimiento ante la Comisión.

Artículo 5. La presentación del Programa para el Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, **es de naturaleza voluntaria**, por lo que, en caso de su incumplimiento, el responsable de la descarga de aguas residuales en cualquier cuerpo receptor propiedad de la nación, quedará sujeto a los plazos establecidos en la mencionada Norma Oficial Mexicana

Artículo 6. El Sujeto Regulado presentará su Programa para el Cumplimiento, en los siguientes supuestos:

- a) Cuando **deba modificar sus instalaciones** con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como el Apéndice Normativo de la NOM-001-SEMARNAT-2021, y que los ajustes y acciones que se deban ejecutar de acuerdo a los estudios realizados por dicho Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor, en el Artículo 2o Transitorio de la NOM, o bien,
- b) Que el Sujeto Regulado **deba modificar los procesos productivos de las actividades que generan la descarga de aguas residuales**, con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como al Apéndice Normativo y que dichas modificaciones, de acuerdo con los análisis o la evidencia del Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor.

Artículo 7. El Sujeto Regulado, en caso de presentar el Programa para el Cumplimiento lo hará por cada uno de los puntos autorizados en su Permiso de Descarga, y que, para cumplir con las disposiciones establecidas en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se ubiquen en alguno de los supuestos establecidos en el Artículo 6 de los Lineamientos.

Artículo 8. Una vez registrado el Programa para el Cumplimiento, y en tanto este se encuentre vigente, en concordancia con el Artículo 5º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, el Sujeto Regulado deberá cumplir, además de lo comprometido en el Programa, con los límites y parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, para gozar de los beneficios e incentivos que para tales efectos establezca la LFD vigente.

Artículo 10. El Programa para el Cumplimiento, contendrá:

- + Nombre, denominación o razón social del Sujeto Regulado;
- + RFC del Sujeto Regulado;
- + Datos de identificación del Permiso de Descarga; Volumen de descarga; Datos del medidor o dispositivo de medición de las aguas residuales descargadas; Coordenadas del punto de descarga;
- + Datos generales del representante legal; Correo electrónico;
- + Justificación de la solicitud para la aplicación del Programa para el Cumplimiento;
- + Cronograma de actividades para las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento; Periodo solicitado;
- + E-Firma del Sujeto Regulado o representante legal.

Artículo 12. Los Programas para el Cumplimiento deberán presentarse ante la CONAGUA, por el Sujeto Regulado **a partir de que entre en vigor la NOM-001-SEMARNAT-2021 y hasta el 3 de abril del 2023.**

El Sujeto Regulado que no presente su Programa para el Cumplimiento en el periodo señalado, se sujetará a los plazos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 13. Los plazos que se establezcan en el Cronograma de Actividades para el seguimiento de las acciones comprometidas en los Programas para el Cumplimiento **no deberán rebasar el 11 de marzo de 2027.**

Artículo 15. La CONAGUA realizará revisiones aleatorias a los Programas para el Cumplimiento, podrá solicitar al Sujeto Regulado, las aclaraciones o información adicional que considere necesarias. En el supuesto de que el Sujeto Regulado no atienda el requerimiento de información dentro de los veinte días hábiles siguientes, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y será aplicable lo establecido en el Artículo 2º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 16. Una vez registrado el Programa ante la CONAGUA, no será objeto de modificación,

salvo en el caso que el Sujeto Regulado justifique la necesidad de realizar algún cambio y no exceda el plazo originalmente establecido.

Artículo 17. El Sujeto Regulado debe presentar **dentro de los primeros cinco días hábiles de los meses de marzo y septiembre de cada año**, a partir de la fecha del registro, el avance de actividades mediante la carga de información que solicite el Sistema de Gestión en el apartado correspondiente al Informe de Avance del Programa para el Cumplimiento. Cuando el Sujeto Regulado no envíe en tiempo y forma la información del Informe de Avance, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y se aplicarán las disposiciones de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 21. La CONAGUA procederá a cancelar el Programa para el Cumplimiento y su registro, cuando compruebe que el Sujeto Regulado no ha cumplido con lo comprometido en el programa registrado. La CONAGUA, procederá a notificar la cancelación del Programa, por lo que quedarán sin efectos las acciones de cumplimiento propuestas por el Sujeto Regulado en su respectivo Programa, aplicándose las disposiciones correspondientes de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 22. Cuando las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento presentado impliquen la suspensión de sus procesos productivos y actividades para llevar a cabo las acciones tendientes a la conversión de procesos productivos o la instalación de maquinaria, equipos o plantas que se requieran para el cumplimiento de los parámetros y límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, y deba quedar fuera de operación el sistema de tratamiento de aguas residuales, el Sujeto Regulado deberá dar aviso a la CONAGUA, al menos 30 días hábiles antes de que esto ocurra, e indicar el periodo por el que prevalecerá dicha situación, el cual **no deberá exceder de tres meses**, y podrá presentarse **hasta un máximo de dos ocasiones** durante la vigencia del Programa.

De llevar a cabo la suspensión de sus procesos de tratamiento de aguas residuales sin el aviso correspondiente se aplicarán las sanciones previstas. Una vez recibida la solicitud, el Sistema de Gestión emitirá el comprobante que acreditará que la solicitud fue hecha en tiempo y forma.

Artículo 23. En caso de incumplimiento a los compromisos establecidos en el Programa para el Cumplimiento, quedan sin efecto las prerrogativas que ampara dicho documento, por lo cual el Sujeto Regulado será acreedor a las sanciones que correspondan y, en su caso, estará obligado a efectuar el pago de los derechos por el uso y aprovechamiento de cuerpos receptores de descargas de aguas residuales propiedad de la nación, a partir de la fecha del incumplimiento, así como de aquéllos que se hubieren generado con anterioridad, con sus accesorios, conforme a la LFD vigente.

Programa de inversión anual

Como se mencionó anteriormente, el monto de inversión total del Plan de Acciones es de

232.52 millones de pesos (mdp), inversión a realizarse en 5 años a partir del año 2023 hasta marzo del 2027, acorde al plazo previsto en los Lineamiento que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el presente apartado se muestra el desglose anual del Plan de Acciones, donde se describe el monto de inversión por año y unidad de proceso y/o componente del proyecto programado, así como los importes anuales y acumulados y su porcentaje de participación en la inversión.

Tabla 24:
Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
A	Proyecto ejecutivo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
B	Cárcamo, regulación, pretratamiento, y/o tratamiento primario	0.00	59.19	0.00	0.00	0.00	59.19
		0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
C	Tren de tratamiento de agua	0.00	17.57	35.15	17.57	0.00	70.29
		0.0%	25.0%	50.0%	25.0%	0.0%	100.0%
D	Tratamiento terciario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
E	Tren de tratamiento de lodos	0.00	0.00	25.03	13.48	0.00	38.50
		0.0%	0.0%	65.0%	35.0%	0.0%	100.0%
F	Cogeneración (y/o paneles solares)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
G	Equipo menor	0.00	3.84	3.01	1.55	0.00	8.40
		0.0%	45.7%	35.8%	18.5%	0.0%	100.0%

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
H	Terracerías, vialidades y patios	0.00	3.84	3.01	1.55	0.00	8.40
		0.0%	45.7%	35.8%	18.5%	0.0%	100.0%
I	Obra eléctrica	0.00	9.60	7.52	3.88	0.00	21.00
		0.0%	45.7%	35.8%	18.5%	0.0%	100.0%
J	Automatización	0.00	2.30	1.81	0.93	0.00	5.04
		0.0%	45.7%	35.8%	18.5%	0.0%	100.0%
K	Imprevistos y contingencias	0.00	6.14	4.81	2.48	0.00	13.44
		0.0%	45.7%	35.8%	18.5%	0.0%	100.0%
L	Supervisión	3.59	2.82	1.45	0.00	0.00	7.86
		45.7%	35.8%	18.5%	0.0%	0.0%	100.0%
M	Capacitación	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.40
		0.0%	50.0%	50.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	Total Anual y Gran total, mdp's	0.00	106.07	83.34	43.10	0.00	232.52
	Acumulado anual, mdp's	0.00	106.07	189.41	232.52	232.52	
	Total Anual y Gran total, %	0.0%	45.6%	35.8%	18.5%	0.0%	100%
	Acumulado anual, %	0.0%	45.6%	81.5%	100.0%	100.0%	

A continuación se muestra de manera gráfica el monto de inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR:

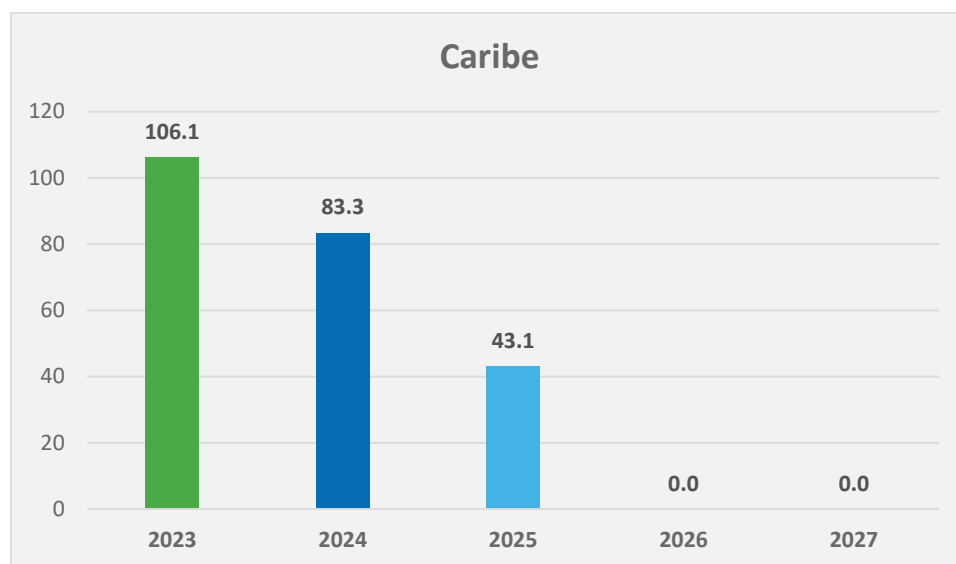


Figura 25 Inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR

Bibliografía

CONAGUA. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. . México: CONAGUA.

GIZ, C. A. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Mexico: GIZ.

Metcalf & Eddy / AECOM. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. NY: McGraw-Hill.

US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Centenario

Contenido

PTAR Centenario.....	1
Contenido	4
Índice de Tablas	5
Índice de Figuras.....	6
1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más.....	8
Descripción general de la PTAR Centenario de Chetumal	8
Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases	9
Descripción general del proceso	10
Diagrama de flujo de proceso	11
Descripción de las unidades de proceso	12
Tren de Tratamiento de Agua	12
Tren de tratamiento de Lodo	21
Estado de conservación y operación de las instalaciones.....	28
Análisis de calidad del agua cruda.....	30
Calidad de agua cruda, histórica	30
Calidad de agua cruda, de este Estudio	30
Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada.....	33
Calidad de agua tratada, histórica.....	33
Calidad de agua tratada, de este Estudio.....	36
Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua	39
Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR	39

Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) de cada planta	40
Estimación de los costos de operación y mantenimiento	41
Observaciones y recomendaciones generales	45
2 Plan de Acciones de las plantas con capacidad igual o mayor a 100 l.p.s. para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	47
Plantas de tratamiento de agua residual de la CAPA	47
PTAR Centenario, Chetumal	47
3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	53
Techo financiero	53
Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales	55
Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares	59
Resumen de inversión, techo financiero	63
4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	67
Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	67
Aspectos Clave de los Lineamientos	68
Programa de inversión anual	71
Bibliografía	74

Índice de Tablas

Tabla 1: Dimensiones Tanque Homogeneizador PTAR Centenario	12
Tabla 2: Dimensiones Reactores de Lodos Activados PTAR Centenario	13
Tabla 3: Dimensiones Clarificadores Secundarios PTAR Centenario	14
Tabla 4: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua	20
Tabla 5: Dimensiones Digestor de Lodos PTAR Centenario	22

Tabla 6: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo	25
Tabla 7: Calidad de agua residual cruda (mg/L)	30
Tabla 8: Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente	32
Tabla 9: Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)	34
Tabla 10: Caracterización del agua tratada de este Estudio (<i>E.coli</i> y Huevos de helminto)	37
Tabla 11: Cumplimiento del agua tratada	38
Tabla 12: Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales	41
Tabla 13: Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M.	43
Tabla 14: Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Centenario.....	49
Tabla 15: Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Centenario	50
Tabla 16: Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio	54
Tabla 17: Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	63
Tabla 18: Monto de inversión, millones de pesos.....	65
Tabla 19: Estimación detallada de costos PTAR Centenario	65
Tabla 20: Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado	71

Índice de Figuras

Figura 1 Vista Aérea PTAR Centenario de Chetumal.....	8
Figura 2 Arreglo general de unidades de la PTAR Centenario de Chetumal.....	11
Figura 3 Estación de recepción de aguas de pipas con agua residuales y residuos de fosas sépticas.	15
Figura 4 Cribado automático (fuera de servicio) y tanque de homogeneización	16
Figura 5 Estructura para izaje y bombas de tanque ecualizador	16
Figura 6 Cabezal de descarga de tanque ecualizador y línea de demasías.....	16
Figura 7 Cribado mecánico y equipo pretratamiento compacto Ro5 en plataforma	17

Figura 8 Reactor de lodos activados y vista general a plataforma de pretratamiento con equipo Ro 5 y cribado	17
Figura 9 Clarificador secundario y vista cárcamo de recirculación de lodos	17
Figura 10 Tanque de contacto de cloro y detalle de agua tratada	18
Figura 11 Caseta de dosificación de cloro y detalle de techo con grietas y desprendimiento de enjarre	18
Figura 12 Detalle de medidor efluente, transductores y registro de caudal	18
Figura 13 Oficinas abandonadas (izquierda) y actuales (derecha) PTAR	19
Figura 14 Caseta de sopladores de reactor de lodos activados	19
Figura 15 Detalle de instalación en cárcamo de recirculación de lodos (izquierda) y cárcamo de natas (derecha).....	23
Figura 16 Digestor de lodos.....	23
Figura 17 Bomba de lodo digerido (fuera de operación) y espesador gravitacional de lodo..	23
Figura 18 Filtro banda y preparador de polímero	24
Figura 19 Filtro banda para desaguado y edificio de desaguado sobre digestor	24
Figura 20 Caracterización del agua cruda (sep-2022)	31
Figura 21 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)	35
Figura 22 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT).....	36
Figura 23 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)	37
Figura 24 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m ³	44
Figura 25 Vista actual de la PTAR Centenario (Chetumal)	48
Figura 26 Diagrama de flujo de la PTAR Centenario con las acciones propuestas	52
Figura 27 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	64
Figura 28 Inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR.....	73

1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más

Descripción general de la PTAR Centenario de Chetumal

La PTAR Centenario de Chetumal se localiza en la zona poniente de la ciudad y proporciona saneamiento a las aguas residuales domésticas y de servicios de la ciudad. CAPA es el responsable de la operación y mantenimiento de la planta, como Organismo Operador de Chetumal. En la Figura 1 se presenta la vista general satelital de la PTAR Centenario.



Figura 1 Vista Aérea PTAR Centenario de Chetumal

Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases

La PTAR Centenario de Chetumal se construyó en 1998 con una capacidad media de tratamiento de 120 L/s. En 2018 tuvo una ampliación de capacidad hasta 180 L/s, que es el caudal de tratamiento actual. La información de CAPA indica que el caudal medio tratado en el año 2021 fue de 130 L/s.

A continuación, se indican las operaciones y procesos que conforman el tren de tratamiento de la PTAR Centenario, el valor entre paréntesis indica el número de unidades:

Tren de tratamiento de agua:

- + Estación de recepción y bombeo para vertidos de pipas con agua residual y descargas de fosas sépticas (1)
- + Tanque de homogenización con estación de bombeo (1)
- + Pretratamiento con cribado automático (1) (fuera de servicio), cribado manual, desarenador-desengrasador compacto (1) (fuera de servicio)
- + Reactor de lodos activados (2)
- + Clarificación secundaria (2)
- + Desinfección con gas cloro, tanque de contacto de cloro (1)
- + Medición de efluente con medidor ultrasónico (1)
- + Pozos de infiltración de agua tratada (no están operando), el efluente escurre a la laguna anexa

Tren de tratamiento de lodos:

- + Espesador de lodo gravitacional (1)
- + Digestión aerobia, aireación por aire difuso (1)
- + Desaguado mecánico, en filtro banda (2), no opera
- + Destino del lodo desaguado se dispone sin desaguar en terrenos de esta PTAR

No existe actualmente ningún reúso del agua tratada más allá de los servicios internos de la PTAR.

Descripción general del proceso

La corriente de agua residual del alcantarillado ingresa al tanque de homogeneización. El tanque es capaz de absorber los picos de agua residual y calidad influente para mantener una alimentación constante a la PTAR. Esta unidad cuenta con dos canales de cribado grueso automático para retención de basuras grandes y agitadores sumergibles para mezclar y mantener en suspensión los sólidos del agua residual. Durante la visita, el cribado grueso y los agitadores sumergibles se encontraba fuera de operación.

Al final del tanque homogeneizador se encuentra una batería de bombas que elevan el agua hacia la plataforma de pretratamiento. Además del agua del alcantarillado, la PTAR cuenta con una estación de bombeo para la recepción de agua pipas, el agua ingresada por este medio también es conducida hacia el pretratamiento.

La plataforma de pretratamiento se compone tres canales de cribado, dos con cribado manual y uno con cribado automático, seguido de una unidad compacta que conjunta una criba rotatoria automática, así como un tanque de desarenación y remoción de grasas. Este último se refiere con frecuencia con su modelo, Ro5, y existe en todas las PTAR de la CAPA. Al momento de la visita, el equipo presentaba deterioro medio y se encontraba fuera de operación.

El agua del pretratada es distribuida hacia uno de los dos reactores de lodos activados de tipo mezcla completa y con aireación difusa. El proceso de acuerdo con los operadores opera bajo aireación extendida. El efluente de esta unidad se dirige hacia los dos clarificadores secundarios existentes, donde se da la separación de los biosólidos del agua. Desde esta unidad se realiza el retorno de lodos a los reactores y la purga de lodo.

El agua clarificada se conduce hacia el tanque de contacto de cloro para su desinfección mediante cloro gas. El agua tratada se envía hacia alguno de los tres pozos de infiltración o hacia el tanque de agua tratada para satisfacer los servicios internos de la planta. La línea principal de agua tratada cuenta con un medidor de caudal ultrasónico.

El lodo secundario purgado del clarificador se envía hacia el digestor aerobio de lodos para realizar la estabilización de lodo. La PTAR cuenta con un sistema de espesado de lodos y natas posterior al digestor, que funciona mediante una recirculación constante entre esta unidad y el digestor aerobio. El lodo efluente del digestor de lodos es enviado hacia un filtro banda para su desaguado.

Al momento de la visita, debido a un problema con las bombas de lodos digeridos, no se podían alimentar el espesado y el desaguado de lodos, por lo que se encontraban fuera de servicio. Los lodos estabilizados con baja concentración de sólidos eran dispuestos dentro de terrenos de la PTAR.

Diagrama de flujo de proceso

Para facilitar la comprensión de los procesos de tratamiento, en la Figura 2 se presenta una vista del arreglo general de unidades de la PTAR Centenario.

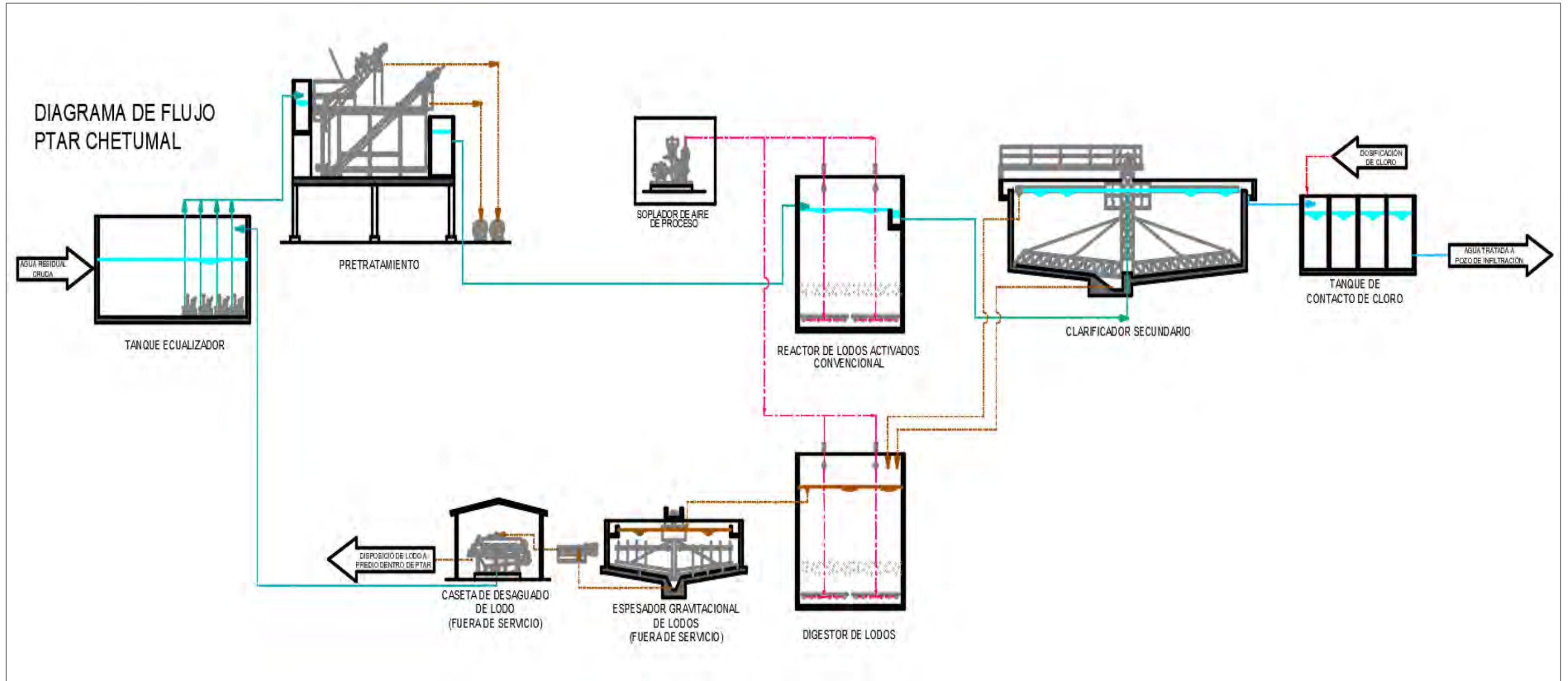


Figura 2 Arreglo general de unidades de la PTAR Centenario de Chetumal

Descripción de las unidades de proceso

Como parte del trabajo de campo elaborado en este Estudio, se recopiló información sobre la condición de operación y mantenimiento de las PTAR visitadas. Más adelante, se presenta esta información para la PTAR Centenario, dividido por unidad de tratamiento.

Tren de Tratamiento de Agua

Estación de recepción de residuos de pipas

Además del agua residual influente por el alcantarillado, la PTAR cuenta con una estación de recepción de agua de pipas (Figura 3). La estación se compone de una losa con cribado grueso y un cárcamo de bombeo para elevar el agua influente hacia el pretratamiento. De acuerdo con el personal de operación, se ingresan aproximadamente 480 a 500 m³/mes de agua residual por esta estación. El ingreso de agua de pipas es un reflejo de la baja cobertura de alcantarillado de la ciudad.

Tanque de homogenización

El tanque de homogeneización amortigua los picos de caudal y calidad de agua influente y permite alimentar un caudal continuo de agua residual a la PTAR. El tanque recibe agua de tres emisores distintos, respectivos a diferentes áreas de la ciudad: el cárcamo No. 8, cárcamo final y cárcamo Caribe), los cuales trabajan en forma alternada y conducen el agua residual doméstica, comercial e industrial a la PTAR.

- + La primera parte del tanque homogeneizador se compone de dos canales de cribado grueso automático, aunque ambos se encontraban fuera de operación al momento de la visita (Figura 4). Después de los canales el agua ingresa al tanque de almacenamiento, esta unidad cuenta con agitadores sumergibles para mantener los sólidos del agua residual en suspensión, aunque al momento de la visita se encontraban fuera de operación. Las dimensiones de este tanque se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1:
Dimensiones Tanque Homogeneizador PTAR Centenario

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	1
Largo	m	15.35
Ancho	m	18.85
Tirante hidráulico	m	4 (hasta 5 en zona de

Concepto	Unidad	Valor
		cárcamo de bombeo)
Volumen total	m ³	1,180

Al final del tanque homogeneizador se encuentra una batería de bombas con las que se eleva el agua hacia la plataforma de pretratamiento (Figura 5). Así mismo, se cuenta con una línea de demasía de agua residual con dirección hacia el efluente de la planta (Figura 6).

Pretratamiento

El agua cruda proveniente del tanque homogeneizador, así como el agua bombeada del cárcamo de pipas ingresa a la plataforma de pretratamiento (Figura 7). El pretratamiento se compone de tres canales de cribado, dos manuales y uno automático, seguido de un equipo de pretratamiento Ro5. Este equipo contaba originalmente con un sistema de criba rotatoria, desarenado horizontal y desengrasado, aunque en la actualidad se encuentra fuera de servicio, por lo que funciona solo como un tanque de paso.

El equipo Ro5 se presenta en todas las PTAR de la CAPA, y en todos presenta problemáticas similares. De acuerdo con información del personal de operación, el principal problema y que desencadena el mal funcionamiento de los restantes es la criba rotatoria, cuyos cepillos limpiadores y rejillas se deterioran muy rápido. El agua efluente del equipo Ro5 se dirige hacia una caja de distribución desde donde se reparte equitativamente hacia los dos reactores de lodos activados.

Reactores de lodos activados

El reactor de lodos activados está modulado en dos unidades del mismo tamaño (Figura 8). El reactor es de tipo mezcla completa y cuenta con aireación difusa de burbuja fina. Actualmente la unidad presenta deterioro medio en las tuberías de conducción de aire y algunos barandales de los pasillos de operación y deterioro severo en mamparas y vertedores de la unidad. En la Tabla 2 se presentan las dimensiones de esta unidad.

Tabla 2:
Dimensiones Reactores de Lodos Activados PTAR Centenario

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	2.0
Largo	m	45.6

Concepto	Unidad	Valor
Ancho	m	15.2
Tirante hidráulico	m	3.9
Volumen total	m ³	5,406

Clarificador secundario

El agua efluente del reactor de lodos activados pasa hacia un clarificador secundario (Figura 9). El clarificador separa los sólidos del agua que pasa clarificada hacia la desinfección. Del cárcamo de lodos de esta unidad se realiza la recirculación de lodo hacia los reactores de lodos activados y la purga de lodo. En la Tabla 3 se presentan las dimensiones de esta unidad.

Tabla 3:
Dimensiones Clarificadores Secundarios PTAR Centenario

Concepto	Unidad	Clarificador
Diámetro	m	28.5
Número de unidades	No.	2
Área	m ²	637.9
Tirante hidráulico, SWD	m	4.62

Desinfección

El agua clarificada es conducida hacia el tanque de contacto de cloro, donde se realiza la desinfección con cloro gas (Figura 10). La caseta de desinfección es de tipo abierta con muros de celosía y presenta algo de deterioro y corrosión en distintas partes (Figura 11). El cloro gas se almacena en tanques de 1 tonelada, de los cuales se cuenta con cuatro instalados, junto a una grúa para izaje. No hay báscula para control y registro del consumo de cloro. El estado de conservación de la caseta mostraba signos de deterioro y corrosión.

Disposición y aprovechamiento de agua tratada

El caudal de agua tratada es registrado por un medidor ultrasónico para después ser conducida hacia alguno de los tres pozos de infiltración (Figura 12). Sin embargo, en la zona de la PTAR se tiene un alto nivel freático y no es posible infiltrar el efluente a la tasa que se genera, por lo que éste termina

escurriendo a la laguna cercana. Al momento de la visita se registraba un caudal producido de 106 L/s.

Otros

Como parte de las acciones de ampliación de la PTAR, se construyeron oficinas nuevas para el personal, quedando las oficinas anteriores abandonadas (Figura 13) . Parte de la ampliación también contemplo la construcción de casetas para los sopladores de proceso y digestión (Figura 14).

Se presenta un problema severo de instalaciones eléctricas dentro de la PTAR. Una inundación de algunos de los registros eléctricos provocó el corto de diferentes equipos de proceso, limitando la operación de la PTAR. Dichos registros no han sido subsanados y es una de las razones por las que se observa tendido de cables superficiales por toda la PTAR. Este mismo fenómeno se presenta en otras PTAR de la CAPA.

Vistas del tren de tratamiento de agua

De la Figura 3 a la Figura 14 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de agua de la PTAR.



Figura 3 Estación de recepción de aguas de pipas con agua residuales y residuos de fosas sépticas.



Figura 4 Cribado automático (fuera de servicio) y tanque de homogeneización



Figura 5 Estructura para izaje y bombas de tanque equalizador

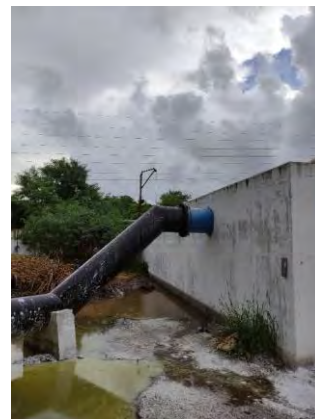


Figura 6 Cabezal de descarga de tanque equalizador y línea de demasías



Figura 7 Cribado mecánico y equipo pretratamiento compacto Ro5 en plataforma



Figura 8 Reactor de lodos activados y vista general a plataforma de pretratamiento con equipo Ro 5 y cribado



Figura 9 Clarificador secundario y vista cárcamo de recirculación de lodos



Figura 10 Tanque de contacto de cloro y detalle de agua tratada



Figura 11 Caseta de dosificación de cloro y detalle de techo con grietas y desprendimiento de enjarre



Figura 12 Detalle de medidor efluente, transductores y registro de caudal



Figura 13 Oficinas abandonadas (izquierda) y actuales (derecha) PTAR



Figura 14 Caseta de sopladores de reactor de lodos activados

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua

Con el fin de verificar que las principales estructuras de proceso del tren de tratamiento de agua sean adecuadas en su diseño para tratar el agua y carga de contaminantes en el agua cruda, se efectuó la evaluación de los parámetros relevantes de cada una, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para tal efecto se utilizaron las dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior, además de la calidad influente a la PTAR establecida por CAPA, presentada a continuación:

- + Caudal medio de diseño 180 L/s
- + Calidad de agua cruda establecida por CAPA:
 - DQO, 640 mg/L
 - SST, 320 mg/L

- DBO, 288 mg/L

En la Tabla 4 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de agua, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado con las dimensiones de las estructuras, en caso de no contar con algún dato de operación se asignó un valor promedio del rango típico. Cabe destacar que la siguiente evaluación considera el funcionamiento adecuado de las unidades, para comprobar su diseño y mejor escenario.

Tabla 4:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor
Tanque de homogeneización			
Volumen	m ³	-	1,180
Tiempo de retención hidráulico	h	-	1.8
Reactor de lodos activados			
Concentración de DBO influente al reactor	mg/L	No aplica	288.0
Concentración de SSTLM	mg/L	3,000 - 4,000	3,500
Fracción volátil		0.7-0.8	0.75
Relación F/M	kg/kg - d	0.2 a 0.6	0.32
Carga volumétrica	kgDBO/m ³ - d	0.3 a 1.6	0.83
Tiempo hidráulico de retención total	horas	5 a 15	8.3
Tirante hidráulico	m	4.5 a 6	3.9
Clarificador Secundario			
Carga hidráulica superficial, Caudal medio	m ³ /m ² -d	16 a 28	12.2
Recirculación	%	25 a 100%	100%
Carga de sólidos, Caudal medio	Kg/m ² - h	4 a 6	3.56

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor
Tirante hidráulico	m	4 a 5	4.6

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + El tanque homogeneizador cuenta con suficiente capacidad de retención y permite satisfactoriamente amortiguar los picos el agua influente a la PTAR, aunque sin el funcionamiento de los agitadores sumergibles se arriesga a una acumulación de arenas en el fondo del tanque.
- + A la condición evaluada, el reactor de lodos activados opera con valores de carga orgánica volumétrica y F/M (0.83 kg DBO/m³-d y 0.32 kg DBO/kg SSV d respectivamente) cercanos a la mitad del rango recomendado (hasta 1.6 kg DBO/m³-d y 0.6 kg DBO/kg SSV d). Por lo que se considera adecuado para su objetivo de diseño.
- + El reactor de lodos activados no opera bajo condiciones de aireación extendida (con F/M debajo de 0.1 kg DBO/kg SSV d) como lo comentado por el personal de operación. Sin embargo, para la temperatura del agua residual, el diseño es robusto y permite una buena flexibilidad de operación.
- + El bajo tirante hidráulico del reactor, de 3.9 m, representa un obstáculo para la transferencia de aire en la difusión de burbuja fina.
- + El clarificador secundario opera por debajo de los rangos inferiores de carga hidráulica recomendados, por lo que cuenta con suficiente capacidad para tratar el caudal de agua de diseño, e incluso tiene capacidad de sobra.
- + La PTAR no cuenta con la infraestructura suficiente ni la modalidad de operación para remover nitrógeno y dar cumplimiento a la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021.

Tren de tratamiento de Lodo

Digestor aerobio de lodo

La purga de lodo secundario se conduce desde el cárcamo de lodo (Figura 9) hacia el digestor aerobio de lodos (Figura 16), las natas secundarias del clarificador se dirigen a esta unidad también. En ambos cárcamos se hace evidente el mal estado de las instalaciones eléctricas, así como el deterioro de soportes y tuberías (Figura 15). Las dimensiones del digestor se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5:
Dimensiones Digestor de Lodos PTAR Centenario

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	1.0
Largo	m	35.4
Ancho	m	15.45
Tirante hidráulico	m	3.9
Volumen total	m ³	2,133

Espesado y desaguado de lodo

El lodo digerido es alimentado a una unidad de espesado gravitacional (Figura 17). Desde esta unidad se recircula una parte del lodo espesado de vuelta al digestor y otra parte es retirada para mandarse hacia el desaguado de lodo. De acuerdo con el diseño, el lodo en el digestor se mantiene a una concentración constante mediante este circuito de recirculación de lodo entre el digestor y el espesador. Al momento de la visita esta unidad se encontraba fuera de operación debido a una falla de las bombas de lodo digerido.

El lodo digerido es mandado hacia desaguado por medio de un filtro banda (Figura 18 y Figura 19) de marca intereco de 1.2 m de ancho de banda. Se cuenta también con un equipo de preparador de polímero exclusivo para alimentar esta unidad (Figura 18). Aunque de acuerdo con el personal, algunos de esos equipos nunca han sido puestos en operación, ya sea por alguna falla u otras razones

Ambos equipos se encuentran en el edificio de manejo de lodos, sobre el digestor de lodos (Figura 19). Al momento de la visita, esta unidad se encontraba fuera de operación, debido a la falla con la bomba de lodo digerido. Con el espesado y desaguado de lodo fuera de operación al momento de la visita, el lodo secundario era purgado a bajas concentraciones directamente dentro de predios de la PTAR.

Vistas del tren de tratamiento de lodo

De la Figura 15 a la Figura 19 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de lodo de la PTAR.



Figura 15 Detalle de instalación en cárcamo de recirculación de lodos (izquierda) y cárcamo de natas (derecha)



Figura 16 Digestor de lodos



Figura 17 Bomba de lodo digerido (fuera de operación) y espesador gravitacional de lodo



Figura 18 Filtro banda y preparador de polímero



Figura 19 Filtro banda para desaguado y edificio de desaguado sobre digestor

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de lodo

Con el fin de verificar que las principales estructuras y equipos de proceso del tren de tratamiento de lodo sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño más relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para esta evaluación se consideraron las siguientes premisas de cálculo:

- + Dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior
- + Producción de lodos, se estimó con base en la fórmula simplificada de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) con los datos de caudal medio de diseño y calidad de agua cruda promedio del histórico (SST y DBO), mismos

que se utilizaron para la evaluación del tren de agua (US EPA, 1993).

- + Para determinar el volumen de lodos se utilizaron las concentraciones típicas esperadas en la purga de lodo secundario.
- + De manera conservadora, se consideró que los equipos mecánicos de desaguado operan con un rango común de operación, 16 horas al día, 5 días a la semana.

En la Tabla 6 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de lodo, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR con las dimensiones de las estructuras y capacidades de equipos. En caso de no contar con algún dato de operación se consideró un valor promedio del rango típico.

Tabla 6:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR
Producción de lodo			
Producción de lodo esperada	kg SST /día	No aplica	4,255
Concentración		0.5 a 1.5%	0.70%
Flujo volumétrico	m ³ /día	No aplica	608
Digestión Aerobia de lodo			
Concentración de lodo en tanque (por espesado de lodo)	%		2%
Volumen de lodo alimentado equivalente	m ³ /día		211.7
Tiempo de retención hidráulico (edad de lodo)	días	18 a 20	10.1
Carga de sólidos volátiles	kgSSV/m ³ -d	1.6 a 4.8	1.5
Destrucción esperada		38 a 50%	38%
Masa de lodo digerido estimada	kg SST /día		3,042
Desaguado de Lodo (centrífuga)			

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR
Días de operación por semana			7
Horas de operación por día			16
Ancho de banda	m	1 a 3	1.2
Carga de sólidos (por metro)	kg/h	250 a 410	158
Carga hidráulica (por metro)	L/min	150 a 340	184
Porcentaje de captura		90 a 98%	95%
Concentración de lodo desaguado		12 a 22%	18.0%
Volumen de lodo desaguado	m ³ /día		22.5
Masa de lodo desaguado estimada	kg SST/día		2,890.2

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + El desempeño de la digestión depende fuertemente del desempeño del espesado de lodos. El esquema actual de operación, con el espesado posterior a la digestión, es poco común, y requiere de un esfuerzo operativo mayor para operarlo adecuadamente. Además, con un espesador gravitacional, la literatura (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014) especifica una concentración de sólidos alcanzable entre 2 y 3%, relativamente baja en comparación a otras tecnologías de espesado.
- + A la condición de evaluada, el digestor aerobio de lodos no cuenta con volumen suficiente para mantener la edad de lodos recomendada de entre 15 y 20 días. Sin embargo, a diferencia de los digestores de otras PTAR de la CAPA, esta edad de lodos podría ser alcanzada si mejora el desempeño del espesado de lodos hasta el 4%. Esta concentración es fácilmente alcanzable mediante un espesado mecánico.
- + A la condición evaluada, con 16 horas de operación al día, los 7 días de la semana, el filtro banda opera con cargas hidráulicas y de sólidos adecuadas para su tamaño.
- + Por lo que se concluye que la unidad es adecuada para su objetivo.
- + El volumen del digestor y el desaguado de lodo son adecuados para su objetivo, solo si el espesado de lodos opera adecuadamente desde un inicio. Es decir, el cuello de botella se encuentra en el espesado de lodos, una mejora en su desempeño incrementaría considerablemente la destrucción de SSV en el digestor aerobio y la sequedad de lodos.

- + Además de las limitaciones por infraestructura, existen algunas limitaciones debido a problemáticas operativas. Por ejemplo, el hecho de que solamente exista una bomba de lodo digerido vuelve susceptible a la PTAR a paros en operación cada que este equipo presente una falla. Se deben diseñar las etapas más sensibles del proceso con redundancia para evitar este tipo de obstáculos.

Estado de conservación y operación de las instalaciones

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de agua de la PTAR Centenario de Chetumal, evaluadas con base en el cumplimiento de la NOM-001-2021 para suelo cárstico en DQO, SST, NT y PT con el promedio histórico de calidad de agua, se clasifican de **“Regulares”**. En la sección **Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada**, se presenta la evaluación de dicha información.

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de lodos, determinadas con base en las condiciones operativas y de desempeño de las operaciones de espesado, digestión y desaguado observadas en la visita, se clasifican como **“Muy malas”**. El tren de lodos está fuera de operación en su totalidad y los lodos sin digerir, ni espesar, ni desaguar son depositados en terrenos de la ptar.

En términos generales las condiciones de mantenimiento de los trenes de tratamiento de agua y de lodos en base a equipos, tuberías e inclusive obra civil se consideran **“Malas”**.

Además de las necesidades de operación y/o procesos de la PTAR encontrados en campo, Chetumal tiene una falta de cobertura de alcantarillado importante. De acuerdo con el personal de CAPA, la cobertura actual es cercana al 50%. Como comprobación, partiendo de la población en 2020 de 169,028 habitantes, a una aportación de 140 L/hab-día, se estima una generación de agua residual de 273 L/s. Si en 2021 el caudal promedio alimentado a la PTAR fue de 130 L/s, esto representa el 48% del total de agua residual generada, lo que cuadra con el registro de cobertura de la CAPA.

En los párrafos subsecuentes se describe lo observado en la visita técnica efectuada a la PTAR.

En los aspectos de operación se observó en forma resumida lo siguiente

- + La recepción de pipas representa un caudal influente importante a la PTAR, derivado de la baja cobertura de alcantarillado.
- + Se encuentran muchos equipos fuera de servicio en toda la etapa de homogeneización y pretratamiento. En el caso del tanque homogeneizador, la falta de agitación propicia la acumulación de arenas en el tanque y disminución de su volumen útil de regulación. Aun así, prueba ser una unidad útil para la flexibilidad de operación del proceso.
- + El equipo de pretratamiento automatizado Ro5 se encuentra fuera de servicio, y presenta los mismos problemas en otras PTAR de la CAPA donde se encuentra instalado. Funciona actualmente como una unidad de paso, aunque puede ser aislada de operación con un arreglo de válvulas.
- + El reactor de lodos activados se observó trabajando satisfactoriamente. Todos los equipos de aireación para proceso operan adecuadamente.
- + El agua clarificada se observó de buena calidad, señal del adecuado funcionamiento de los clarificadores secundarios.
- + La desinfección se aplica mediante cloro gas. La caseta de desinfección presenta deterioro medio en algunos soportes y equipos. Además, carece de báscula para tanques de cloro, kits para control de fugas y detector de fugas, todos ellos indispensables para el manejo seguro

de este gas.

- + Deterioro estructural severo y riesgo de falla con fisuras en el techo de la caseta de cloración. Además de señales de severa corrosión química en esta área. También se observaron grietas en el techo de la caseta de desaguado.
- + El agua tratada y desinfectada es descargada por una línea que cuentan con un medidor de caudal de tipo ultrasónico. Solo esta sección de la PTAR cuenta con medidor de flujo.
- + Para disposición del efluente, la planta tiene 3 pozos para absorción que no están operando por alto nivel de aguas subterráneas debido a la proximidad con una laguna superficial, por lo que la disposición se hace en forma superficial hacia la laguna.
- + La digestión aerobia de lodos estaba trabajando, sin embargo, el equipo de espesado y el de desaguado estaban fuera de operación debido a una falla con la bomba de lodos digeridos. Dado que solo existe una bomba de lodo digerido, la PTAR se encuentra limitada por este aspecto.
- + Debido a la cercanía de la PTAR del cuerpo de agua, los lodos no espesados ni desaguados terminan por llegar a esta laguna, con el impacto ambiental consecuente.
- + En el medidor del efluente de la planta durante la visita se tenía un caudal de 106 L/s.

Con respecto al equipamiento mecánico se observa lo que a continuación se describe:

- + Se presenta un problema similar al de otras PTAR de la CAPA con las instalaciones eléctricas dentro de la PTAR. Algunos equipos eléctricos que han presentado fallas se han arreglado en campo, aunque permanecen tendidos los cables y conexiones a la intemperie.
- + Muchos paneles de control de equipo se encuentran contiguos al equipo en cuestión, algunos de estos tableros de control no fueron hechos para encontrarse expuestos al ambiente y empiezan a presentar deterioro.
- + El personal de operación comenta que el desaguado de lodos instalado no ha podido ser puesto en marcha debido a diferentes problemáticas operativas en la PTAR y de pruebas de proceso.

No obstante lo anterior la apariencia del agua tratada era satisfactoria, posiblemente derivado del bajo caudal que están tratando en relación a la capacidad de la PTAR.

El área de saneamiento de la CAPA elaboró en mayo de este 2022 un plan de ampliación y rehabilitación para esta PTAR Centenario de Chetumal que deberá adecuarse tomando en cuenta los requerimientos de la NOM-001- SEMARNAT 2021 para cuerpo receptor suelo cárstico. Es de esperarse que el presente trabajo contribuya a este fin.

En el Anexo 1 (Ficha de la PTAR) se presenta la descripción detallada de las características y condiciones actuales de operación y mantenimiento de las estructuras y equipos del tren de agua y lodos.

Análisis de calidad del agua cruda

Calidad de agua cruda, histórica

A continuación, se presentan los datos de calidad de agua cruda proporcionados en la Base de Datos de la CAPA para la PTAR Centenario. No se proporcionaron datos de varios muestreos, únicamente los valores presentados en la siguiente tabla.

Tabla 7:
Calidad de agua residual cruda (mg/L)

SST	DBO	DQO	Nitrógeno Total	Fósforo Total
320	--	640	55	6.0

Calidad de agua cruda, de este Estudio

Del 26 al 27 de septiembre se efectuó un muestreo compuesto de 24 horas tanto en el influente y efluente de la PTAR Centenario, este se efectuó con seis muestras simples, a cada una de estas se les realizaron los siguientes análisis de campo:

- + pH
- + Temperatura del agua
- + Cloro residual libre (efluente)

Los parámetros analizados en el laboratorio fueron los siguientes:

- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)
- + Escherichia coli (efluente)
- + Toxicidad Vibrio fischeri (efluente)
- + Huevos de helminto
- + Color verdadero (UV-Vis) a 436, 525 y 620 nm

Las actividades de colecta, preservación y análisis de las muestras fueron realizadas por personal de Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis (Intertek + ABC Analitic), éste cuenta con la acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA) en la rama de agua número AG-096-029/11 para su laboratorio ubicado en la ciudad de México y AG-096-029/11_S1 para el laboratorio de Mérida, que es donde se realizarán los análisis.

En todos los casos, la preservación y el almacenamiento de las muestras se efectuaron de acuerdo con los lineamientos que establece la normatividad mexicana. Las muestras colectadas fueron preservadas con hielo a una temperatura de 4°C con la intención de que no se degradaran, y fueron transportadas en una hielera al laboratorio correspondiente para su análisis.

El transporte se hizo con sumo cuidado, de tal forma que se evitaron los derrames y/o contaminación de muestras debido a rupturas de frascos o cualquier otro accidente.

Los diferentes frascos que integran las muestras se preservaron con los reactivos señalados en la normatividad.

En el Anexo 3 se presentan los resultados completos del laboratorio del influente y efluente de la PTAR Centenario. En la Figura 20 se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Centenario.

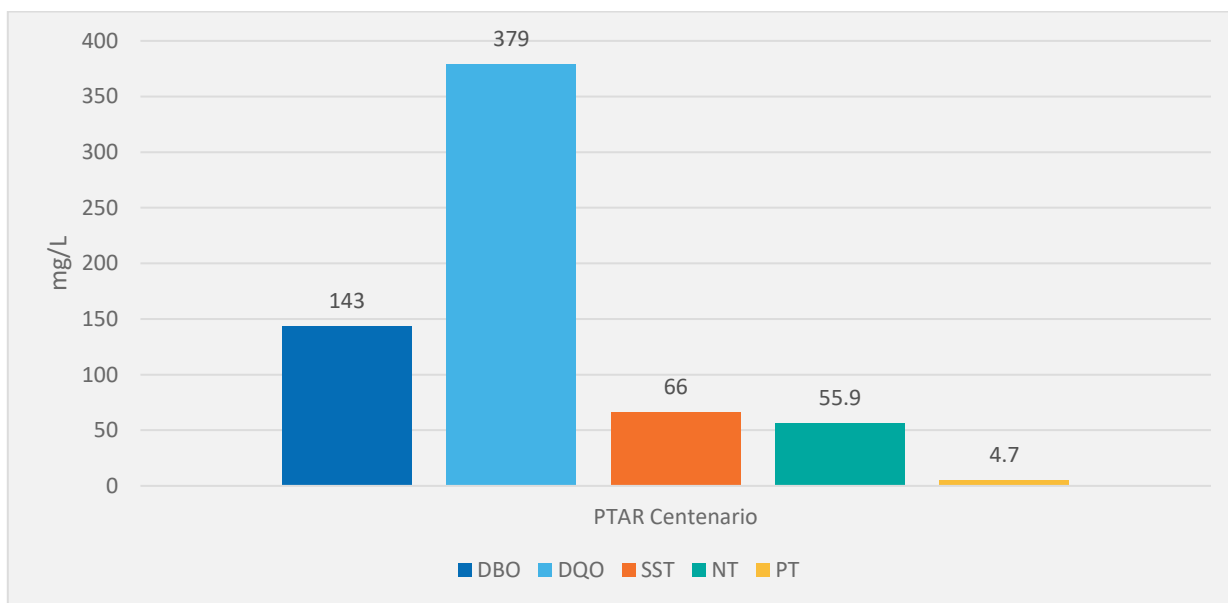


Figura 20 Caracterización del agua cruda (sep-2022)

Con la finalidad de conocer la relación de contaminantes, se realizaron los cálculos que a continuación se presentan en la siguiente tabla, los cuales fueron determinados con los valores obtenidos en este Estudio.

Tabla 8:
Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente

Relación	Valor Estudio 2022	Rango típico en Aguas Residuales Municipales ¹
DBO5/ DQO	0.38	0.45 – 0.55
SST/ DBO	0.46	0.80 – 1.20
NTK/ DBO	0.39	0.10 – 0.20
Fósforo/ DBO	0.03	0.02

¹ (US EPA, 1993)

Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada

En las siguientes figuras y tablas se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada del histórico de datos proporcionados por CAPA y de los obtenidos en el presente Estudio, en estas se presentan los límites permisibles (LP) establecidos en la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Calidad de agua tratada, histórica

Se proporcionaron datos de 108 muestreos de tipo compuesto efectuados en el efluente durante el periodo del año 2020 al 2021.

Los parámetros incluidos en las bases de datos de CAPA son los siguientes:

- + Caudal promedio
- + Temperatura
- + pH: Potencial de hidrógeno
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos sedimentables
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Nitrógeno amoniacal (N-NH₃)
- + Fósforo total (PT)
- + Coliformes fecales
- + Arsénico
- + Cadmio
- + Cianuro
- + Cobre
- + Cromo
- + Mercurio
- + Níquel
- + Plomo
- + Zinc

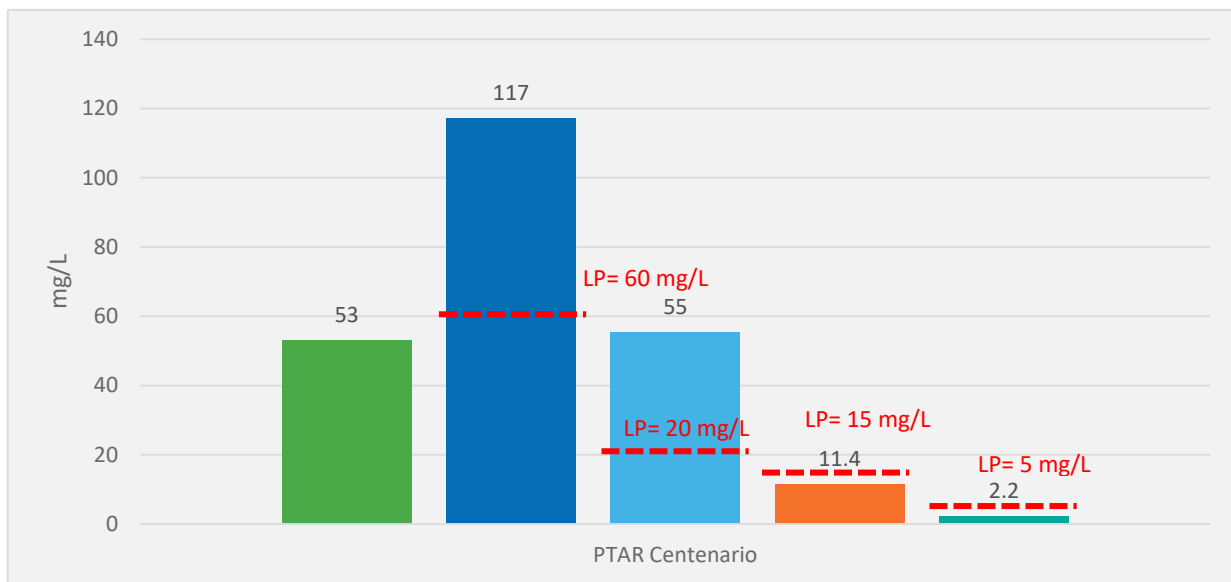
En la siguiente tabla se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros en el agua

tratada de la PTAR Centenario.

Tabla 9:
Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)

Concepto	G A mg/L	SST mg/L	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	NT mg/L	NTK mg/L	PT mg/L	Huevos de helminto (huevos/L)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
No. De datos	106	108	106	103	106	106	106	106	106
Mínimo	5	14	19	42	2.64	2.42	0.20	0.2	3
1° cuartil	5	27	27	68	6.26	5.60	0.53	0.2	3
Promedio	7	55	53	117	11.43	11.13	2.24	0.2	3
Mediana	5	52	50	114	11.12	11.00	1.20	0.2	3
3° cuartil	10	75	73	152	16.02	15.92	2.65	0.2	3
Máximo	13	232	98	225	25.10	25.00	11.00	0.2	3

A manera de resumen en la Figura 21 se presentan los valores promedio de los principales parámetros del agua tratada de la PTAR Centenario, en esta se indican los límites permisibles (LP) para el promedio mensual en la NOM-001-2021.

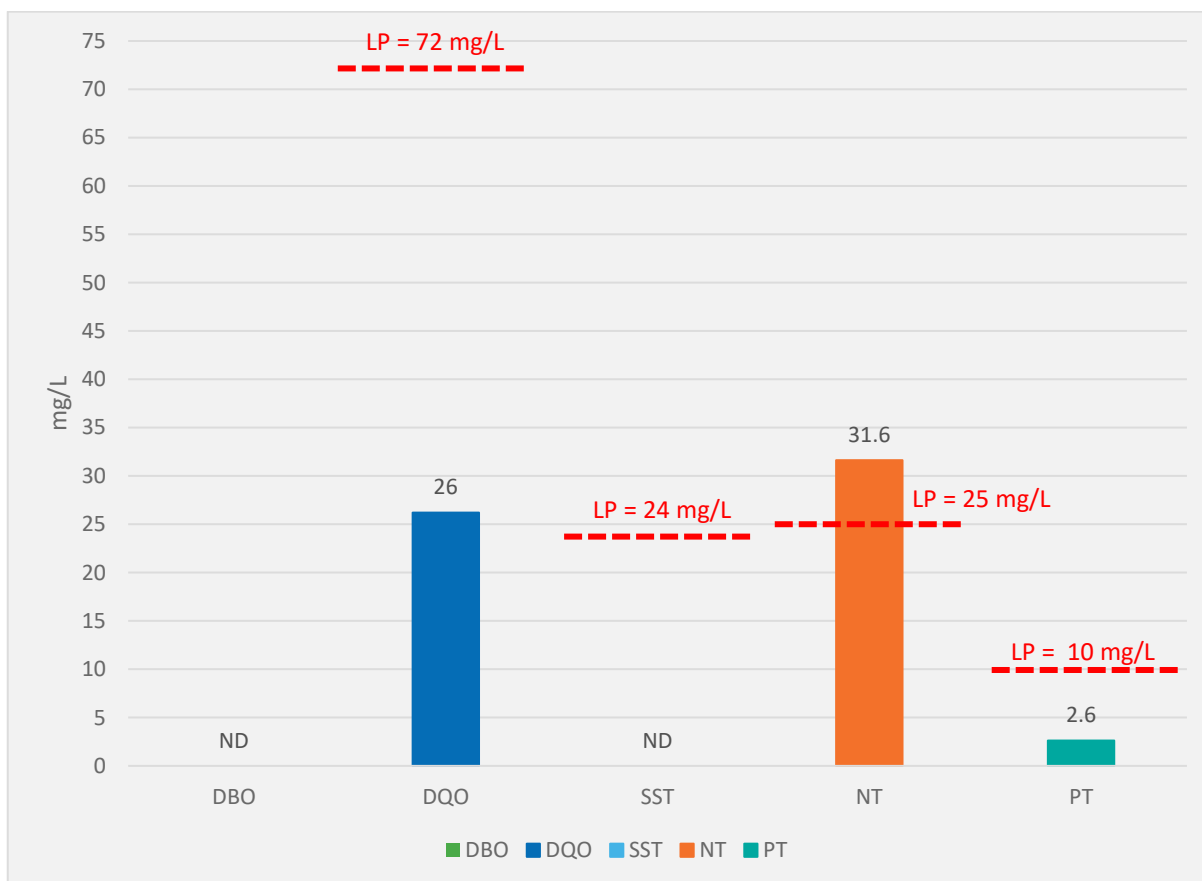


LP = Límite permisible

Figura 21 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)

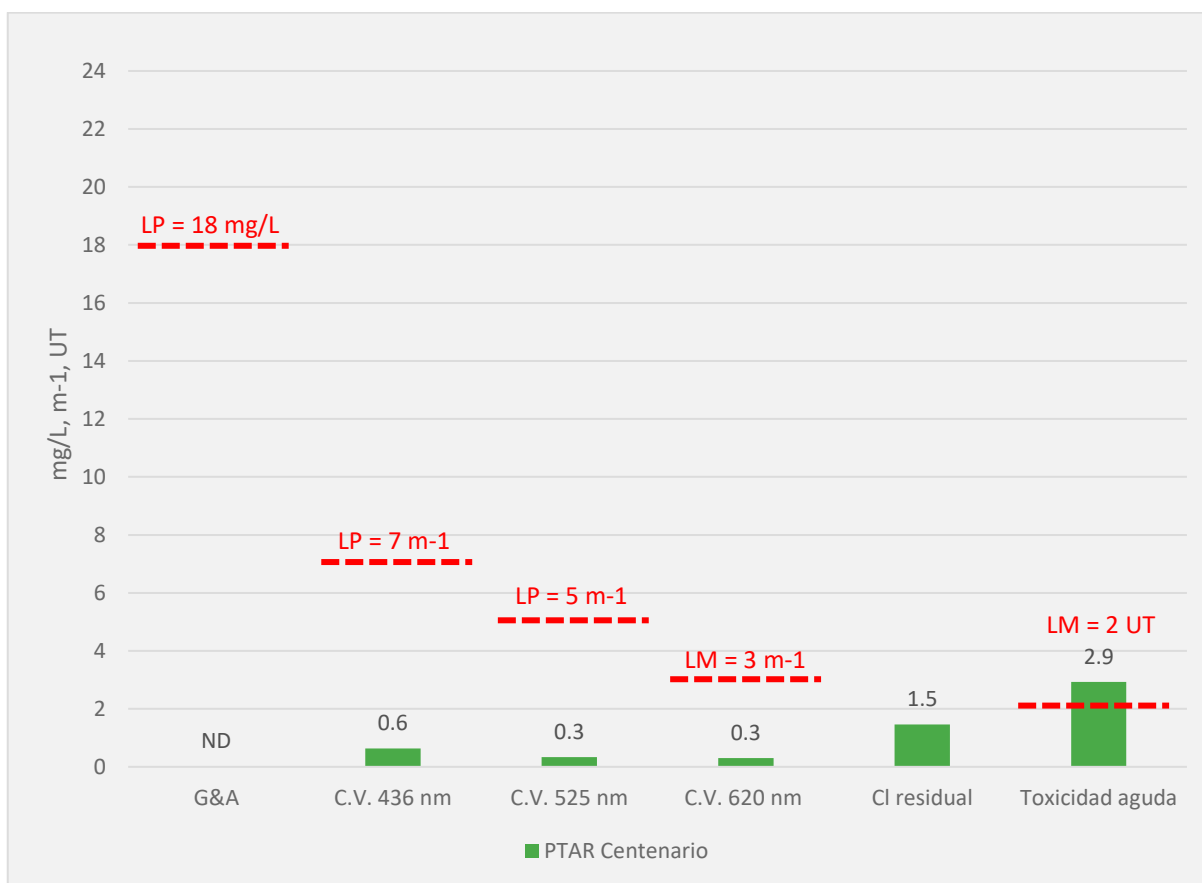
Calidad de agua tratada, de este Estudio

En la siguientes figuras y tabla se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada de la PTAR Centenario, en estas se indican los límites permisibles para el promedio diario en la NOM-001-2021.



LP = Límite permisible

Figura 22 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 23 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)

Tabla 10:
Caracterización del agua tratada de este Estudio (*E.coli* y Huevos de helminto)

Parámetro	Unidades	PTAR Centenario	Límite permisible NOM-001-2021
E.coli	NMP/100 mL	5	100
Huevos de helminto	HH/L	<0.2	1

Con la información histórica de calidad de agua tratada proporcionada por CAPA y los resultados de los análisis efectuados se efectuó el análisis del cumplimiento de los principales parámetros de calidad del agua con respecto a la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021, para los valores de los datos históricos se utilizó el límite permisible del valor promedio mensual y para los resultados de los muestreos efectuados en este Estudio se utilizó el límite permisible del valor promedio diario.

Tabla 11:
Cumplimiento del agua tratada

Parámetro	Valor promedio histórico (2020-2021) (mg/L)	Valor Estudio 2022 (mg/L)	Límite permisible NOM-001-2021	Cumple
SST	55	No detectado	PM = 20 (mg/L) PD = 24 (mg/L)	NO SI
DQO	117	26	PM = 60 (mg/L) PD = 72 (mg/L)	NO SI
Nitrógeno total	11.4	31.6	PM = 15 (mg/L) PD = 25 (mg/L)	SI NO
Fósforo total	2.2	2.6	PM = 5 (mg/L) PD = 10 (mg/L)	SI

PM = promedio mensual, PD = promedio diario

Con respecto al color verdadero en las tres longitudes de onda y la concentración de *E.coli* se obtuvieron valores dentro del límite permisible, la toxicidad dió por encima del límite permisible dado que muestra se tomó aguas abajo de la etapa de cloración y el cloro aporta toxicidad al agua.

Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua

Como parte de las actividades realizadas en campo, sin embargo, no se pudieron registrar por carecer de acceso seguro a los pozos de absorción por encontrarse en zona pantanosa.

Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR

Pendiente de incorporar, no se ha recibido la información por parte de CAPA.

Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) de cada planta

De acuerdo con la información proporcionada por la CAPA, el costo total de O & M de la PTAR Centenario en el año 2021 fue de 9.50 millones de pesos (mdp's), desagregado de la siguiente forma:

- + Costo de operación: 5.70 mdp's
- + Costo de mantenimiento: 3.80 mdp's

Considerando que el caudal medio de agua tratada en el año 2021 fue de 130 L/s, que representan un volumen anual de 4,099,680 m³, el costo unitario de O & M es de 2.32 \$/m³ de agua tratada.

En relación con la energía eléctrica consumida en el proceso de tratamiento, la información proporcionada indica los siguientes valores anuales:

- + Consumo anual de energía: 1,473,240 kWh
- + Costo anual: \$ 4,312,123

A partir de los valores previos se calcularon los siguientes indicadores:

- + Costo unitario de la energía: 2.93 \$/kWh
- + Consumo unitario de energía: 0.36 kWh/m³
- + Costo energía respecto al costo O & M: 45 %

En la información del costo de O & M, así como la de consumo y costo de energía eléctrica se debe tener en consideración lo siguiente respecto a la PTAR Centenario:

- + Se efectúa bombeo de agua cruda del tanque homogeneizador al pretratamiento.
- + El proceso de tratamiento de agua es lodos activados. La calidad del agua tratada es "Regular".
- + El espesado y desaguado de lodo no operan, obviando el consumo y costo de energía eléctrica y polímero.
- + El lodo digerido se dispone de manera líquida en el terreno, eliminando el costo de acarreo y disposición de lodo desaguado.
- + La planta carece del personal suficiente requerido para su adecuada operación y mantenimiento.

Estimación de los costos de operación y mantenimiento

A efecto de comparar el costo de operación reportado por la CAPA contra un costo de referencia se procedió a estimar los costos anuales de un grupo de insumos relevantes:

- + Energía eléctrica,
- + Cloro para desinfección,
- + Polímero para espesado y/o desaguado de lodo,
- + Acarreo de lodo desaguado, y
- + Análisis de laboratorio de agua tratada y lodo para cumplimiento normativo y control de proceso
- + Personal de O & M

Para lo anterior, con base en un caudal medio de 130 L/s y la información de caudal y calidad de agua cruda y tratada proporcionada por el Organismo Operador se efectuó un balance de materia simplificado para establecer la masa de DBO removida, la generación de lodos en el tratamiento del agua, la remoción de sólidos suspendidos volátiles en el proceso de digestión y la masa de lodo desaguado a disposición.

Una vez definidos en el balance de materia los valores requeridos, a partir del caudal y calidad del agua cruda influente a la planta, se procedió a aplicar los factores de dosificación o consumo de los principales insumos (energía eléctrica, cloro polímero para espesado y/o polímero para desaguado) con base en las prácticas adecuadas de operación y, en el caso de los análisis de laboratorio de agua tratada y lodos, a partir de los requerimientos normativos.

En la Tabla 12 se presentan las consideraciones aplicadas para establecer el consumo de los insumos arriba indicados, así como el costo unitario asignado:

Tabla 12:
Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Energía eléctrica	Caudal medio de agua tratada y concentración promedio de DBO	2.08 kWh/kgDBO	2.50 \$/kWh
Cloro	Caudal medio de agua tratada	5.0 mg/L	20 \$/kg

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Polímero para espesado	Producción de lodo con base en caudal medio y concentración promedio de DBO y SST	No aplica, espesador gravitacional existente, sin dosificación de polímero	No aplica
Polímero para desaguado	Fracción volátil del 75 % del lodo producido y remoción del 40 % de SSV en digestor	7.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Acarreo lodo desaguado, base húmeda	Lodo desaguado al 20 % de sólidos Masa de lodo en base seca/0.20	Ton de lodo en base húmeda	150 \$/ton
Análisis laboratorio Agua tratada	NOM-001 población > 50 mil habitantes	2 muestreos/mes	8,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Lodo / biosólidos	NOM-004 hasta 1,500 ton/año (base seca)	1 muestreos/año	10,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Control de proceso	---	1 lote por mes	6,000 \$/mes

El costo del mantenimiento preventivo de la PTAR y los consumibles asociados a esa actividad se estimó aplicando el criterio de destinar un importe anual equivalente al 0.85 % del costo de inversión de la planta con sus actuales características. El costo de la planta se estableció a partir de un costo base de 750 mil pesos por litro – segundo de capacidad media instalada.

Para establecer el costo del personal de operación y mantenimiento se considera una plantilla “tipo” de doce personas, misma que se desagrega en las siguientes plazas: 1 Jefe de planta, 2 Supervisores de operación/mantenimiento, 5 operadores y 4 auxiliares de operación o mantenimiento.

Los sueldos considerados para establecer este rubro de costo están en el rango de 28,000 pesos mensuales para el Jefe de planta y de 12,000 pesos por mes para el auxiliar de operación, los sueldos del resto del personal están comprendidos dentro de este rango.

Los sueldos nominales se afectaron por un factor de 1.50 para incorporar el costo de las diversas prestaciones y seguridad social del personal. De esta forma se determinó un costo total mensual de\$ 306, 000 por concepto de personal.

El factor unitario de consumo de energía eléctrica asignado permite establecer, además de la energía consumida por la planta, otros indicadores que en la PTAR Centenario tienen el siguiente valor:

- + Consumo unitario de energía: 0.57 kWh/m³
- + Potencia media de operación: 672 kilowatts

En la Tabla 13 se presentan los consumos e importes anuales de los rubros de costo establecidos, así como el costo unitario de cada rubro, al dividir su importe anual entre el volumen de agua tratada. Posteriormente, en la Figura se presenta de manera grafica el costo unitario desagregado por insumo.

Tabla 13:
Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M

Insumo	Consumo anual	Importe anual \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Energía eléctrica	2,353,544	5,883,861	1.44
Cloro	20,498	409,968	0.10
Polímero para espesado	--	--	0.0
Polímero para desaguado	6,979	1,046,894	0.26
Acarreo lodo desaguado	4,362	654,309	0.16
Análisis laboratorio		274,000	0.07
Mantenimiento		1,147,500	0.28
Personal de O & M		3,672,000	0.90
Total		13,088,532	3.19

Energía eléctrica consumo anual expresado en KWH; cloro, polímero para espesado y polímero para desaguado, en kg; acarreo de lodo, en toneladas.

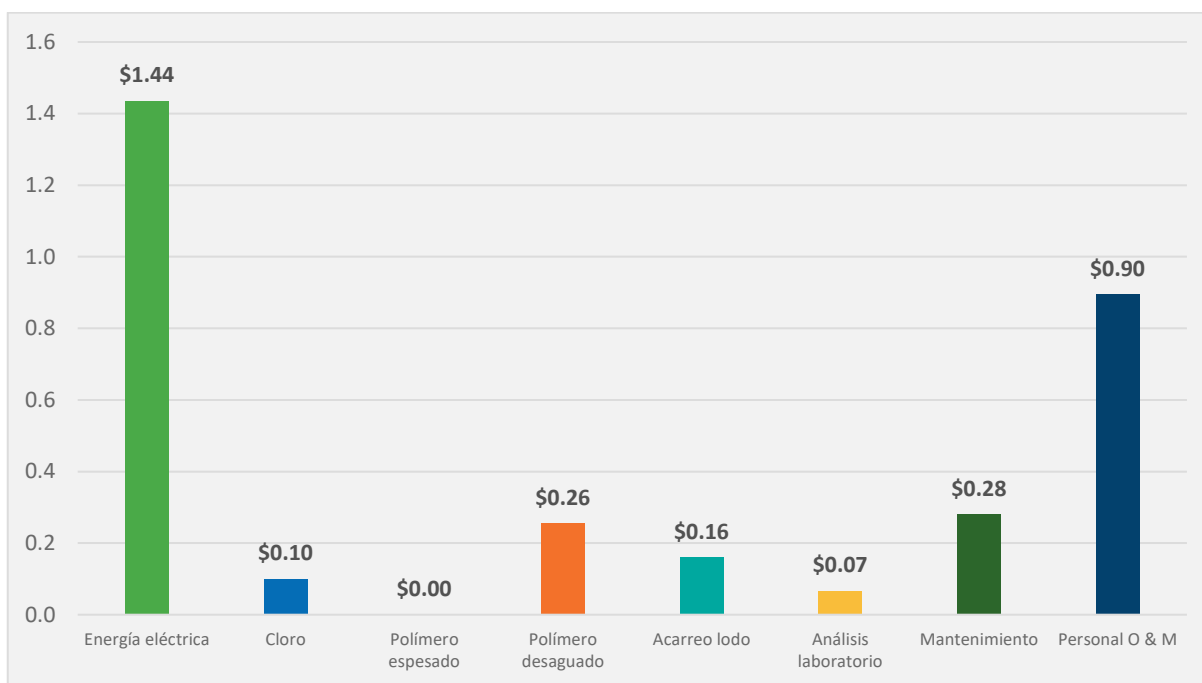


Figura 24 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m³

El importe anual de operación y mantenimiento estimado en esta sección es de 13.09 millones de pesos, con un costo unitario de O & M de 3.19 \$/m³ de agua tratada

Al comparar el importe anual de O & M estimado con el reportado por la CAPA, de 9.5 millones de pesos, se tiene una excedencia de ≈ 3.6 mdp's en el costo estimado con respecto al reportado, lo que representa un 27 %.

La diferencia entre el costo estimado y el reportado por la CAPA, no obstante la imprecisión propia del método aplicado, indica moderada insuficiencia de recursos humanos, materiales y económicos para operar y mantener la PTAR Centenario.

Esta situación se confirma con lo observado en la visita de campo respecto a las condiciones actuales de operación del tren de agua y lodos, así como en la calidad de agua tratada; dichas condiciones si bien con deficiencias son, con mucho, mejores que las condiciones que imperan en las plantas Bicentenario y San Miguelito.

Observaciones y recomendaciones generales

A continuación, se presentan las observaciones y recomendaciones que se desprenden de la evaluación de la información proporcionada por el operador y del diagnóstico en campo y gabinete:

1. La principal problemática actual en el tren de agua se debe a la falla de prácticamente todos los equipos del pretratamiento (cribas automáticas, agitadores sumergibles, equipo Ro 5). Continuar este modo de operación, y sin un mantenimiento adecuado terminará por llevar a la falla equipos importantes, la acumulación de arenas y basuras y eventualmente no poder cumplir con la calidad de agua objetivo.
2. El tanque homogeneizador toma un papel importante en la flexibilidad de operación de la PTAR. Sin embargo, sin agitación se azolva lentamente disminuyendo su volumen útil.
3. El reactor de lodos activados y el clarificador secundario cuentan con suficiente capacidad para tratar todo el caudal influente a la PTAR. Esto, aunado a que se recibe cerca de un 70% del caudal de diseño, resulta en una buena calidad de agua efluente. Aunque no se logra cumplimiento del nitrógeno, pues el tren no fue diseñado con este objetivo.
4. La principal problemática en el tren de lodos se debe a la falla de la bomba de lodos digeridos, la cual debe ser arreglada a corto plazo. Esta falla provoca que no se lleve a cabo el espesado ni el desaguado de lodo, por lo que los lodos son dispuestos a baja concentración. Por la ubicación de la PTAR estos lodos terminan en la laguna contigua y causan un daño ecológico grave.
5. La PTAR presenta deterioro leve o medio en la mayoría de las áreas, además que se observan cables expuestos a la intemperie que representan un riesgo para los trabajadores. En general se necesario realizar un mantenimiento general de toda la PTAR, en lo civil, eléctrico y de interconexiones, pues la falta de mantenimiento adecuado disminuye su vida útil.
6. Es necesario llevar a cabo un plan de rehabilitación y ampliación de la PTAR a corto/mediano plazo considere el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, pero además que se considere una partida importante de los recursos para el desarrollo del resto de la infraestructura de saneamiento como el alcantarillado.
7. Es necesario implementar un programa de muestreo de calidad de agua cruda y tratada para poder desarrollar los planes de ampliación y mejora de la PTAR.
8. Es necesario realizar un registro más detallado de las condiciones de operación de la PTAR e implementar un programa para el monitoreo de las aguas residuales que ingresan por medio de pipas.

9. Es necesario implementar un programa de capacitación para el personal que ingrese a las PTAR, para establecer un recurso técnico suficiente para solventar los problemas comunes que puedan surgir.



2 Plan de Acciones de las plantas con capacidad igual o mayor a 100 l.p.s. para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Plantas de tratamiento de agua residual de la CAPA

PTAR Centenario, Chetumal

El proyecto de la PTAR Centenario tiene caudal de diseño de 360 L/s en tres etapas modulares de 120 L/s, fue construida la primera etapa en el 2008. En el año 2015 iniciaron los trabajos para incrementar su capacidad a 240 L/s con la construcción del Nuevo Módulo de Pretratamiento y su equipamiento con capacidad de 720 L/s (I Etapa), actualmente está equipado para 360 L/s. En el año 2017 se continuó con la construcción del Tanque Ecuilizador de Nivel Variable y su equipamiento (II Etapa) la cual está en operación.

El Proyecto de Ampliación del 2018 continuó con la construcción de los módulos de tratamiento de agua y lodos para incrementar la capacidad hasta 180 L/s en concordancia con el Proyecto Ejecutivo original.

Debido al alto costo de inversión que representa concluir la PTAR para 240 L/s, se elaboró el proyecto: “Reingeniería y Ampliación de la PTAR 1er Centenario de 120 a 180 L/s” y se dividieron las inversiones en dos etapas de construcción ejecutándose la primera etapa.

El proyecto de ampliación a 240 L/s será con una etapa más de construcción de la cual están proyectados sus alcances pero no su costo. La construcción del segundo módulo de Reactor Biológico y la ampliación del Digestor de Lodos hasta 240 L/s se consideraron necesarios pero no prioritarios a corto plazo por lo que se optó realizar su construcción en la segunda etapa.

Las acciones que se proponen para la PTAR Centenario consideran que el caudal medio de diseño se mantiene sin cambio respecto al actual, que es de 180 litros por segundo.



Figura 25 Vista actual de la PTAR Centenario (Chetumal)

Para las tres plantas de la CAPA motivo de estudio, se presentó la opción de incorporar en el tren de agua un sedimentador primario o un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA), previo al reactor de lodos activados.

El RAFA con el beneficio de mayor remoción de DBO ($\approx 65\%$, contra $\approx 35\%$ del sedimentador primario), además de efectuar la estabilización anaerobia del lodo primario y purga de secundario en el RAFA.

La CAPA seleccionó que el tratamiento de agua se mantuviera de tipo aerobio en reactor de lodos activados, sin alguna etapa previa.

En la Tabla 14 se presenta el resumen de las acciones propuestas para que la planta pueda cumplir con las especificaciones y límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para las descargas a suelo cárstico.

Tabla 14:
Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Centenario

Etapa de Tratamiento	PTAR Centenario
TREN DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	Existente, mejoramiento
Regulación agua cruda/pretratada	Existente
Sedimentación primaria	No aplica
Filtro biológico	No aplica
Biológico remoción DBO	Existente, mejoramiento
Biológico remoción de fósforo	Se incorpora
Biológico remoción nitrógeno	Se incorpora
Filtración terciaria	No aplica
Desinfección	Cloro gas existente, mejoramiento Definir el esquema a mediano y largo plazo.
TREN DE LODO	
Espesado	Existente, mejoramiento
Digestión aerobia	Existente, mejoramiento
Digestión anaerobia y cogeneración	No aplica
Desaguado	Existente, mejoramiento

En la Tabla 15 se presenta la descripción y características de las acciones propuestas de rehabilitación, mejoramiento o incorporación de etapas y/o equipos para la PTAR Centenario.

Tabla 15:
Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Centenario

Etapa de tratamiento	Centenario
TREN DE AGUA	
Pretratamiento	1. Rehabilitar el cribado grueso, podría quedar de tipo manual 2. Incorporar agitador sumergible en el tanque de regulación 3. Rehabilitar cribado fino y desarenación 4. Incorporar clasificador de arenas 5. Incorporar estación de recepción y pretratamiento de descargas de pipas.
Tratamiento Primario	1. No aplica
Tratamiento Secundario	1. Incorporar tanque anaerobio para remoción biológica de fósforo, de requerirse • Sin información reciente de concentración de Fósforo en agua cruda 2. Incorporar tanque anóxico 3. Aumentar volumen del tanque aerobio existente, • volumen adicional adosado al tanque anaerobio y anóxico 4. Incorporar recirculación interna al tanque anóxico 5. Incorporar mezcladores sumergibles al tanque anóxico 6. Revisar capacidad de aereación (2 sopladores centrífugos multietapa, de 150 kw)
Clarificación Secundaria	1. Se utilizan los dos clarificadores secundarios existentes
Tratamiento Terciario	1. No aplica
Desinfección	1. Rehabilitación de caseta y del sistema de cloración existentes • Caseta tipo confinada 2. Se utiliza el tanque de contacto de cloro existente
TREN DE LODO	
Espesamiento de lodos	1. Habilitar y poner en operación el espesador gravitacional existente
Digestión de lodos	1. Verificar volumen del digestor existente • $\approx 2,200 \text{ m}^3$ 2. Revisar capacidad de aereación • 1 soplador centrífugo multietapa, de ¿150 kw?

Etapa de tratamiento	Centenario
Desaguado de lodos	- Rehabilitar y poner en operación el filtro banda existente, - Verificar si la capacidad del equipo es suficiente: (1.5 m ancho de banda, 5-15 m³/hr, 200 kg/hr/m)
Secado adicional de lodo desaguado	No aplica
TEMAS VARIOS	- Actualizar el proyecto ejecutivo de la PTAR para adecuar el tren de agua y de lodos a los requerimientos derivados del cambio normativo, en particular la remoción de N y P. - Incluir medición de flujo en las corrientes de agua y de lodo. - Incorporar medición en línea de Nitratos y Nitrógeno amoniacal para control de proceso. - Otras acciones adicionales de rehabilitación por definir con la CAPA

A continuación, en la Figura 26 se presenta el diagrama de flujo del tren de tratamiento de agua y de lodos de la PTAR Centenario incorporando las acciones propuestas para que la planta produzca agua tratada que cumpla con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas a suelo cárstico.

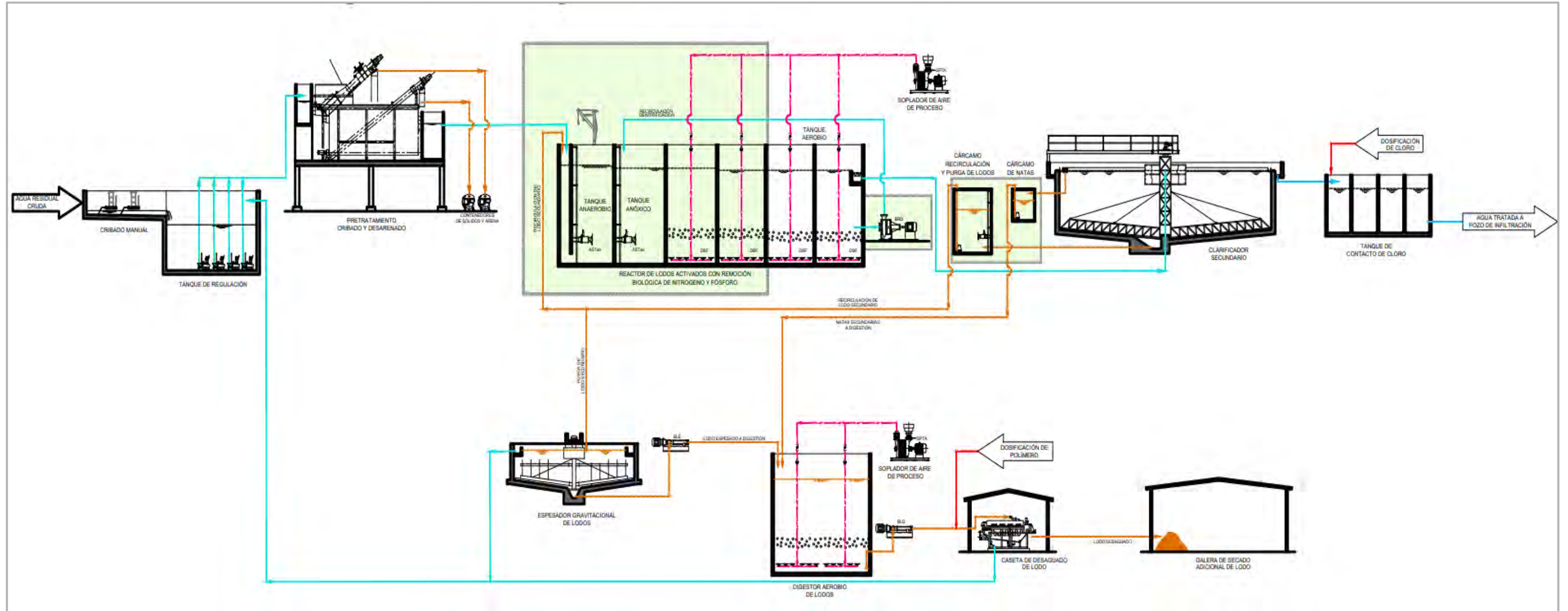


Figura 26 Diagrama de flujo de la PTAR Centenario con las acciones propuestas



3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Las acciones de mejora surgen de la visita y diagnóstico técnico que se presenta previamente, así como de las entrevistas e información recabada con las áreas responsables de la operación y gestión de los recursos para saneamiento.

Techo financiero

El techo financiero para la implementación de las acciones de mejora y rehabilitación de la PTAR, se realizó a partir de costos paramétricos, como lo indican los Términos de Referencia.

Para lo anterior se recurrió a costos base de unidades de proceso y equipamiento similares y de capacidad comparable con las necesidades de las PTAR que forman parte de este estudio, de igual manera dichos costos son ajustados de acuerdo a la capacidad necesaria.

En la Tabla 16 se muestran los costos base por unidad de proceso, los cuales corresponden al costo de mercado establecido en proyectos realizados en el año 2021 y 2022 en Quintana Roo, en plantas de tratamiento con proceso de remoción biológica de nitrógeno y fósforo, así como equipamiento electromecánico y de proceso, tanto de tipo convencional como relativamente nuevo en la región, como es la filtración terciaria y la desinfección con lámparas ultravioleta.

Tabla 16:
Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio

Unidad de proceso	Costo base en MDP
Tren de Tratamiento de Agua	
Pretratamiento mecánico	20.97
Regulación agua cruda/pretratada	12.65
Sedimentación primaria	13.12
Caja distribuidora agua primaria	0.99
Filtro biológico	
Biológico remoción DBO	22.99
Biológico remoción de fósforo	2.50
Biológico remoción nitrógeno	5.75
Clarificación secundaria	14.80
Recirculación y purga de lodo	6.89
Filtración terciaria	12.12
Desinfección	10.49
Pozo de infiltración	1.60
Tren de Tratamiento de Lodo	
Espesado de lodo	7.79
Digestión aerobia	16.09
Digestión anaerobia	59.55
Tanque de lodo digerido	3.77
Desaguado de lodo	17.43
Cogeneración	18.81

Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con las acciones a realizar en la PTAR se estimaron los costos de inversión, esto de acuerdo con los costos base y el factor de ajuste, los cuales están relacionado con el caudal de tratamiento.

A continuación se describe el procedimiento aplicado a cada planta de tratamiento (identificada como PTAR "n") para establecer el techo financiero preliminar de los recursos económicos requeridos para implementar el plan de acciones:

1. Los costos de referencia de las unidades de proceso se ajustaron a valores de noviembre de 2022 con el factor de actualización que resulta de dividir el INPC de noviembre entre el INPC del mes en que se originó el presupuesto.

A manera de ejemplo, a continuación se describe el procedimiento:

- Fecha del presupuesto de la unidad de proceso o PTAR de referencia: octubre de 2021.
- Valor del INPC en octubre de 2021: 115.561
- Valor del INPC de noviembre de 2022: 125.997
- Factor de actualización costo de referencia: $125.997/115.561 = 1.090$

2. El costo de referencia del proceso de digestión anaerobia y del sistema de cogeneración se determina con base en un digestor anaerobio con sistemas periféricos; tamizado de lodo, tratamiento lateral de la corriente de desaguado de lodo anaerobio; antorcha de quemado de biogás, gasómetro para almacenar el biogás generado, acondicionamiento de biogás; caseta de equipos de digestión y sistema de cogeneración.

En la siguiente tabla se presenta el desglose y capacidad de los componentes de las etapas de digestión anaerobia de lodos y del sistema de cogeneración:

Etapas de Digestión Anaerobia de Lodo

Concepto	Importe actualizado, mdp
Tamizado de lodo (capacidad para 5 L/s de lodo espesado al 5%)	1.22
Digestor anaerobio mesofílico (de 5 700 m ³)	43.25
Gasómetro de membrana y periféricos (de 1.000 m ³)	6.14
Quemador de biogás y periféricos (capacidad para 225 m ³ /h)	1.59

Concepto	Importe actualizado, mdp
Edificios operativos	2.71
Tratamiento lateral del agua retirada en desaguado de lodo	4.64
Subtotal	59.55
Obra eléctrica (12 % del subtotal)	7.44
Control (3 % del subtotal + obra eléctrica)	2.01
Contingencias (8 % del subtotal + obra eléctrica + control)	5.52
Total	74.53

Sistema de Cogeneración

Concepto	Importe actualizado, mdp
Sistema de tratamiento de biogás (capacidad para 225 m ³ /h) para remoción de humedad, impurezas y H ₂ S	7.10
Sistema integral de cogeneración (capacidad de 500 kW eléctricos)	11.72
Total	18.81

El costo actualizado de las unidades de proceso se ajustó posteriormente en función de la capacidad (a caudal medio) de las unidades de proceso de la PTAR "n", en relación con la capacidad de la PTAR de referencia, acorde a lo siguiente:

$$\text{Costo PTAR "n"} = \text{Costo PTAR de referencia} * ((\text{Tamaño PTAR "n"} / \text{Tamaño PTAR referencia})^{0.70})$$

La capacidad de la PTAR de referencia es para un caudal promedio de 150 L/s.

A manera de ejemplo, al utilizar la ecuación anterior, y considerando que la PTAR "n" es de 350 L/s de capacidad, se obtiene un multiplicador de 1.81, mismo que se aplica sobre el importe de las unidades de proceso de la PTAR de referencia.

De esta forma, en lugar de ajustar el costo de la PTAR "n" con una relación lineal entre el tamaño de ambas plantas (2.33), el criterio toma en cuenta que el costo unitario de inversión (\$ por L/s de capacidad) disminuye al aumentar el tamaño de la unidad de proceso y/o de la PTAR.

Este procedimiento de ajuste de costo se utilizó en las unidades de proceso cuyo dimensionamiento está determinado por la capacidad y carga hidráulica, como es el caso de las etapas que a continuación se indican:

- Pretratamiento (cribado y desarenación)
- Regulación y/o bombeo de agua cruda/pretratada
- Sedimentación primaria
- Caja distribuidora agua primaria
- Clarificación secundaria
- Recirculación y purga de lodo
- Filtración terciaria
- Desinfección
- Tanque de lodo digerido

Asimismo, el procedimiento de ajuste de costo descrito en este numeral también es aplicable en los procesos biológicos de tratamiento de agua y en las operaciones y procesos del tren de tratamiento de lodos, cuando en la PTAR "n" se presenta la condición de carga influente orgánica y de sólidos que se describe en el siguiente numeral.

3. El factor de ponderación arriba referido se utiliza de manera directa si la carga contaminante influente a la PTAR "n", expresada como la concentración promedio de la DBO y SST en el agua residual cruda, es comparable a la de ($\leq 20\%$) la PTAR de referencia.

La concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente a la PTAR de referencia es 350 mg/L.

Se considera que el agua residual influente a la PTAR "n" es comparable al agua residual de la PTAR de referencia, cuando la concentración promedio de DBO y SST está en el rango de $\pm 20\%$ a la concentración indicada en el párrafo previo.

4. A continuación se enlistan las operaciones y procesos del tren de tratamiento de agua y de lodos que, en caso de variación mayor al 20 % en la concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente, estarían sujetos a ajuste de costo adicional al ya aplicado en el numeral 3.
 - Filtro rociador
 - Reactor de lodos activados, remoción DBO
 - Reactor de lodos activados, remoción de fosforo
 - Reactor de lodos activados, remoción nitrógeno
 - Espesado de lodo
 - Digestión aerobia
 - Digestión anaerobia
 - Desaguado de lodo

En los casos en que la calidad del agua residual influente a la PTAR "n" tiene una variación superior al 20%, hacia arriba o hacia abajo, se procedió a aplicar un ajuste adicional al costo de inversión en las operaciones y procesos del listado inmediato previo.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual influente es $\approx 30\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.05 o 0.90, según corresponda.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual es $\approx 40\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.12 o 0.80, según corresponda.

5. Se aplicó un factor de ponderación para los casos en que la actividad propuesta no es una unidad de proceso nueva y completa, es decir que consiste en la rehabilitación, mejoramiento o complemento de capacidad de una etapa de proceso o unidad existente.

El valor del factor de ponderación asignado en estos casos está en el rango de 0.35 a 0.65, a criterio del especialista, en función del grado de intervención que se requiere para la unidad de proceso en cuestión.

En términos generales, los valores cercanos al límite inferior del rango se aplicaron cuando la acción implicaba rehabilitación civil única o principalmente; los valores cercanos al límite superior se aplicaron cuando la intervención implica también reequipamiento electromecánico.

6. Una vez establecido el importe de inversión por planta de las principales unidades del tren de tratamiento de agua y de lodos, para determinar el importe de otros componentes de la PTAR a dicho importe se aplicó un valor seleccionado de los rangos de porcentaje que a continuación se indican:

Equipo menor:	5 % a 8 %
Vialidades, patios y obras exteriores:	1 % a 5 %
Obra eléctrica:	10 % a 15 %
Automatización y control:	3 % a 5 %
Imprevistos y contingencias:	8 % a 12 %

7. El importe por elaboración del proyecto ejecutivo de las acciones propuestas por planta se determinó a partir de un porcentaje, en el rango del 1.2 % al 3.5 %, mismo que se aplicó sobre el importe total estimado.

8. El costo de la supervisión de la ejecución y puesta en marcha de las obras y equipamiento propuestas en el Plan de Acciones por planta, se estableció aplicando un porcentaje del 3.5 % sobre el importe total estimado, sin incluir los importes correspondientes al costo del proyecto ejecutivo y de capacitación.

Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares

La selección de la digestión anaerobia como proceso de tratamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, orientado a la generación de biogás para su aprovechamiento, o bien la opción de instalar paneles solares en estas plantas, ha sido justificada mediante criterios técnicos específicos. Estos criterios incluyen la capacidad operativa de las plantas, la disponibilidad de espacio físico y las propiedades de la carga orgánica influente. En particular, en el caso de las PTAR ubicadas en el Estado de Quintana Roo, el contexto local en que se encuentra cada planta cobra especial relevancia, dado que las condiciones geográficas, ambientales y de infraestructura turística pueden influir en la viabilidad y eficiencia de cada tecnología implementada.

Este análisis permite una decisión fundamentada, buscando optimizar tanto el rendimiento energético como el aprovechamiento sostenible de los recursos locales.

Antecedentes

Como parte del diagnóstico para el mejoramiento de las PTAR de Quintana Roo mayores a 100 L/s, la digestión anaerobia se considera en las siguientes PTAR:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur que recibe también los lodos de la PTAR Caribe
4. PTAR Saas Tun Ha (a futuro, mediano plazo)

Adicionalmente, la instalación de paneles solares se considera en las siguientes PTAR, de las cuales las primeras tres son instalaciones existentes:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur
4. PTAR El Rey
5. PTAR Saas Tun Ha
6. PTAR San Miguelito
7. PTAR Bicentenario
8. PTAR Centenario

Digestión Anaerobia y Cogeneración

La digestión anaerobia es un proceso biológico mediante el cual los lodos residuales se descomponen en ausencia de oxígeno, generando biogás. El biogás, compuesto principalmente de metano, puede ser aprovechado para producir electricidad y calor mediante sistemas de cogeneración. Además de reducir el volumen de lodos, la digestión anaerobia permite un manejo más eficiente de los residuos, mejorando la sostenibilidad de las plantas al aprovechar el potencial energético del metano.

Los principales aspectos considerados para proponer digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás en las PTAR se presentan en seguida. Todos fueron considerados en conjunto para cada planta.

Condiciones climáticas

La temperatura está relacionada con la velocidad de las reacciones químicas. En el diseño de la digestión anaerobia, la temperatura aumenta la velocidad de hidrólisis y de formación de metano, además disminuye el mínimo tiempo de retención requerido para llegar a una destrucción de sólidos aceptable (38 % en SSV).

Para un proceso mesofílico, que es el seleccionado para las PTAR de Quintana Roo, las temperaturas óptimas se encuentran entre los 30 y 38°C (Metcalf & Eddy, 2014), lo cual es fácilmente alcanzado en la región, con temperaturas de agua residual alrededor de los 30°C todo el año. El no requerir un sistema para control fino de la temperatura es una gran ventaja de toda la zona.

Carga orgánica influente

Se requiere mantener cierta carga orgánica para mantener el equilibrio entre los microorganismos que realizan la digestión anaerobia y mantener una producción de biogás constante. La carga orgánica alimentada al digestor proviene de la fracción de SSV en los lodos generados en el proceso primario y/o secundario y éstos a su vez dependen de las características del agua residual.

En general, la carga orgánica influente necesaria proviene de un análisis detallado del proceso para cada caso, sin embargo, existen lineamientos con reglas generales para anticipar este resultado. En el caso de las PTAR de Quintana Roo, se consideraron para digestión anaerobia las PTAR que en su operación actual o a capacidad plena, recibieran más de 300 L/s o carga orgánica igual o mayor a 7.5 ton DBO/d, esto de acuerdo con estudios técnicos realizados previamente por GIZ (GIZ México, 2017).

Toxicidad

La digestión anaerobia es un proceso sensible a variaciones de pH y puede verse afectada por la presencia de ciertas sustancias inhibitoras en las aguas residuales. Para la instalación de

una nueva PTAR, es fundamental realizar análisis previos para descartar la presencia de estos compuestos que puedan interferir en el proceso. En el presente caso, dado que las PTAR evaluadas ya están en operación, se ha verificado que en los sitios propuestos para la digestión anaerobia no se han registrado historiales de inhibiciones significativas al proceso biológico, lo que garantiza su viabilidad.

Volumen y tipo de lodos generados

Una de las principales ventajas de la digestión anaerobia es la generación de biogás, siendo más eficiente esta generación cuanto mayor es la carga orgánica en los sólidos alimentados. En los sitios propuestos, además de lodos secundarios, se procesan lodos primarios con alto contenido de SSV, lo que incrementa la generación de biogás. Las altas cargas orgánicas influentes a las plantas aseguran buena generación de sólidos, maximizando la eficiencia del sistema de digestión.

Disponibilidad de espacio

Los sitios con propuesta de digestión anaerobia fueron revisados para la disponibilidad de espacio para una unidad de digestión anaerobia junto con gasómetro e instalaciones de cogeneración y manejo de biogás.

Disponibilidad operativa

La digestión anaerobia es una unidad significativamente más compleja que las demás en el tren de tratamiento, lo que demanda mayor capacidad técnica y un personal operativo especializado para su correcta operación a lo largo de la vida útil de la PTAR. En las plantas propuestas, se considera que cuentan con el personal y la capacidad técnica necesarios para implementar y mantener este proceso de manera eficiente.

Viabilidad operativa

Con base en la calidad de agua, la temperatura, el caudal influente y el tipo de proceso, es posible estimar la cantidad de lodos producidos en cada PTAR. Los lodos producidos son la base para estimar el tamaño ideal del digestor anaerobio. De acuerdo con la literatura (Metcalf & Eddy, 2014) el tiempo de retención recomendado para los lodos a 30°C es de 6 a 14 días y la carga orgánica puede variar entre los 1.6 y 4.8 kg SSV/m³ d.

A manera de ejemplo, con el volumen de 5,700 m³/d y a una carga de 2.4 kg SSV/ m³ d sería posible alimentar hasta 13.7 toneladas al día de lodo. Este flujo másico a una concentración de 3.5 % en sólidos tendría un tiempo de residencia de 14.6 días. La producción de lodo actual de las PTAR seleccionadas para digestión anaerobia varía entre 6.7 y 9.9 toneladas al día, y puede ser aún mayor de acuerdo con la capacidad de tratamiento de agua residual instalada. El volumen seleccionado considera este crecimiento además de las necesidades actuales.

Conclusiones para biogás y cogeneración

Los aspectos anteriores se analizaron y forman parte del análisis de costo presentado. En general en las PTAR seleccionadas es positiva la presencia de la digestión anaerobia. En resumen, para seleccionar las PTAR donde es viable instalar digestión anaerobia se consideró que:

1. La temperatura de la zona es favorable con 30°C.
2. La carga orgánica influente a las PTAR y/o el caudal se encuentran en el umbral de 7.5 ton/d de DBO o 300 L/s de caudal tratado.
3. Los procesos biológicos existentes no presentan obstáculos por sustancias inhibidoras.
4. La presencia de lodo primario favorece la producción de biogás.
5. Existe suficiente espacio para la instalación de las unidades respectivas.
6. Existe suficiente personal operativo y capacidad técnica para mantener la unidad funcionando eficientemente.
7. El volumen seleccionado como base para los costos cubre los rangos de operación actuales y futuros de cada PTAR.
8. En el balance económico, la producción y aprovechamiento del biogás es un instrumento importante para hacer viable la operación de las PTAR más grandes.

Generación de Energía Solar

A diferencia de la digestión anaerobia, la instalación de paneles solares es un proceso más sencillo y viable para prácticamente cualquier PTAR. El criterio principal para su implementación fue la disponibilidad de espacio en la planta y su tamaño, siendo seleccionadas aquellas de mediana o gran escala.

Las plantas que no tienen suficiente carga orgánica para justificar la digestión anaerobia, pero disponen de amplias áreas, pueden aprovechar los paneles solares para reducir su dependencia de la red eléctrica y generar energía renovable de manera sostenible. En consecuencia, esta tecnología se considera para casi todas las PTAR.

El costo de implementación de ambas tecnologías no es equivalente, siendo la digestión anaerobia considerablemente más costosa. Sin embargo, como se muestra en el análisis económico, la generación de biogás a escalas superiores al umbral establecido por la GIZ produce una cantidad significativa de energía eléctrica, generando importantes ahorros a largo plazo. Además, la digestión anaerobia requiere una mayor capacidad técnica para su operación. En contraste, los paneles solares, más sencillos de instalar y mantener, representan una opción accesible y conveniente para todas las PTAR.

A continuación se presenta una tabla resumen con los principales criterios utilizados para la selección de digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás, así como para la instalación de paneles solares.

			Principales Criterios para selección de Digestión Anaerobia					Criterio de selección para la instalación de Paneles Solares	
Nombre de la planta	Capacidad instalada (L/s)	DBO entrada (mg/L)	Carga orgánica influente (Ton DBO /día)	Carga orgánica > 7.5 ton / día	Sedimentación primaria (Lodo primario)	Disponibilidad operativa	Digestión Anaerobia	Espacio disponible	Paneles solares
Centenario (Chetumal)	180	320	5.0	NO	NO	NO	NO	SI	SI

Resumen de inversión, techo financiero

En la Tabla 17 se muestra el monto de inversión por unidad de proceso o componente de proyecto, y en la Figura 27 se muestra su distribución porcentual.

Tabla 17:
Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Etapa o componente	Importe PTAR Centenario, mdp's
Proyecto ejecutivo	1.35
Bombeo / regulación / pretratamiento / primario	10.72
Remoción DBO y nutrientes, desinfección	17.94
Tratamiento terciario	
Tren de tratamiento de lodos	22.14
Digestión anaerobia	
Cogeneración	
Paneles solares	8.40
Equipo menor	4.14
Terracerías, vialidades, patios	2.37
Obra eléctrica	8.88
Automatización y control	1.78

Etapa o componente	Importe PTAR Centenario, mdp's
Imprevistos y contingencias	7.10
Supervisión	2.94
Capacitación	0.40
Total	88.15

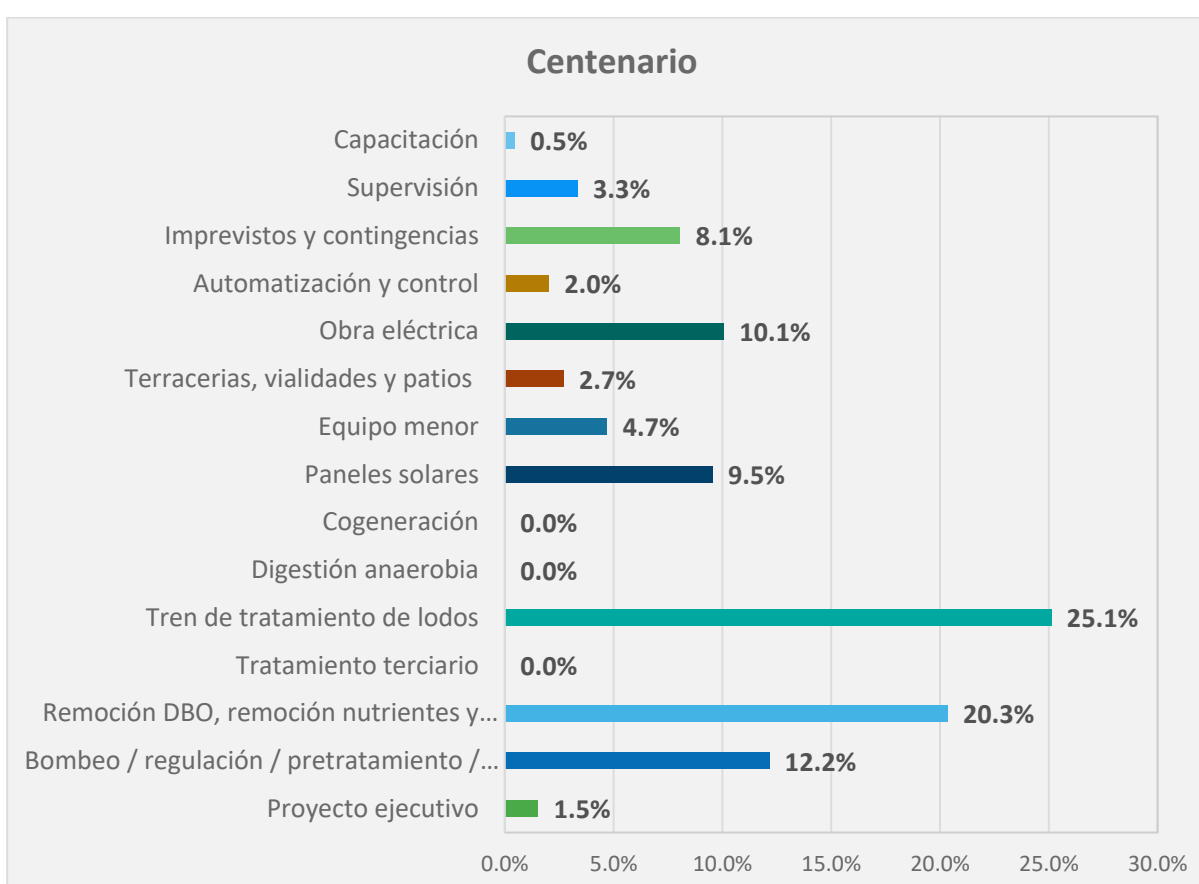


Figura 27 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

En la **Tabla 18** se muestra el resumen del techo financiero total.

Tabla 18:
Monto de inversión, millones de pesos

PTAR	Capacidad instalada, L/s	Capacidad propuesta, L/s	Inversión requerida	Inversión Digestión Anaerobia	Inversión Cogeneración	Inversión Paneles solares	Inversión Total	Inversión unitaria, k\$/lps
Centenario 180	180	180	79.7	--	--	8.4	88.1	490

A continuación, se muestra la estimación detallada de costos, se describe la unidad de proceso, el factor de ajuste integrado y monto de inversión estimado, así como los porcentajes aplicados a las obras complementarias: vialidades, obra eléctrica, de control e instrumentación, imprevistos, proyecto ejecutivo, supervisión y capacitación.

Tabla 19:
Estimación detallada de costos PTAR Centenario

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tren de Tratamiento de Agua		
Pretratamiento mecánico	0.51	10.72
Regulación agua cruda/pretratada		
Sedimentación primaria		
Caja distribuidora agua primaria		
Filtro biológico		
Biológico remoción DBO		
Biológica remoción de fósforo	1.14	2.84
Biológico remoción nitrógeno	0.91	5.22
Clarificación secundaria		
Recirculación y purga de lodo	0.57	3.91
Filtración terciaria		
Desinfección	0.57	5.96
Pozos de infiltración		
Tren de Tratamiento de Lodos		
Espesado	0.40	3.10
Digestión aerobia	0.57	9.14

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Digestión anaerobia		
Tanque de lodo digerido		
Desaguado	0.57	9.90
Cogeneración		8.40
Subtotal		59.19
Equipo menor	7.0%	4.14
Terracerías, vialidades y patios	4.0%	2.37
Obra eléctrica	15.0%	8.88
Automatización y control	3.0%	1.78
Imprevistos y contingencias	12.0%	7.10
Proyecto ejecutivo		1.35
Supervisión		2.94
Capacitación		0.40
Total		88.15



4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el programa de inversiones necesarias por ejecutar para que la PTAR cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; este programa abarca del año 2023 al año 2027.

Este programa de inversiones es el resultado de las acciones propuestas para mejorar la calidad del agua tratada de las PTAR con capacidad de tratamiento igual o mayor a 100 l/s en el estado de Quintana Roo, así como el presupuesto derivado del plan de acciones. La programación de las inversiones se basa en las necesidades propias de cada planta considerando el objetivo principal, que es el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

El 5 de diciembre de 2022 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación los:

LINEAMIENTOS que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Los Lineamientos constan en total de veintitrés artículos, más un artículo transitorio, así como el denominado Anexo A: Instructivo para la Información Requerida en el Sistema.

Los Lineamientos están estructurados en seis capítulos:

- + Capítulo Primero, Disposiciones Generales
- + Capítulo Segundo, Requisitos para la Presentación y Registro de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Tercero, De los Plazos de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Cuarto, Procedimiento para la presentación, registro y revisión de los Programas para el Cumplimiento, así como del Informe de Avances
- + Capítulo Quinto, De las Verificaciones
- + Capítulo Sexto, De las Sanciones

Aspectos Clave de los Lineamientos

Artículo 2. Sujeto Regulado: El responsable de descargas de aguas residuales al que resulte aplicable la NOM-001-SEMARNAT-2021, quien podrá presentar sus Programas para el Cumplimiento ante la Comisión.

Artículo 5. La presentación del Programa para el Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, **es de naturaleza voluntaria**, por lo que, en caso de su incumplimiento, el responsable de la descarga de aguas residuales en cualquier cuerpo receptor propiedad de la nación, quedará sujeto a los plazos establecidos en la mencionada Norma Oficial Mexicana

Artículo 6. El Sujeto Regulado presentará su Programa para el Cumplimiento, en los siguientes supuestos:

- a) Cuando **deba modificar sus instalaciones** con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como el Apéndice Normativo de la NOM-001-SEMARNAT-2021, y que los ajustes y acciones que se deban ejecutar de acuerdo a los estudios realizados por dicho Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor, en el Artículo 2o Transitorio de la NOM, o bien,
- b) Que el Sujeto Regulado **deba modificar los procesos productivos de las actividades que generan la descarga de aguas residuales**, con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como al Apéndice Normativo y que dichas modificaciones, de acuerdo con los análisis o la evidencia del Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor.

Artículo 7. El Sujeto Regulado, en caso de presentar el Programa para el Cumplimiento lo hará por cada uno de los puntos autorizados en su Permiso de Descarga, y que, para cumplir con las disposiciones establecidas en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se ubiquen en alguno de los supuestos establecidos en el Artículo 6 de los Lineamientos.

Artículo 8. Una vez registrado el Programa para el Cumplimiento, y en tanto este se encuentre vigente, en concordancia con el Artículo 5º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, el Sujeto Regulado deberá cumplir, además de lo comprometido en el Programa, con los límites y parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, para gozar de los beneficios e incentivos que para tales efectos establezca la LFD vigente.

Artículo 10. El Programa para el Cumplimiento, contendrá:

- + Nombre, denominación o razón social del Sujeto Regulado;
- + RFC del Sujeto Regulado;
- + Datos de identificación del Permiso de Descarga; Volumen de descarga; Datos del medidor o dispositivo de medición de las aguas residuales descargadas; Coordenadas del punto de descarga;
- + Datos generales del representante legal; Correo electrónico;
- + Justificación de la solicitud para la aplicación del Programa para el Cumplimiento;
- + Cronograma de actividades para las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento; Periodo solicitado;
- + E-Firma del Sujeto Regulado o representante legal.

Artículo 12. Los Programas para el Cumplimiento deberán presentarse ante la CONAGUA, por el Sujeto Regulado **a partir de que entre en vigor la NOM-001-SEMARNAT-2021 y hasta el 3 de abril del 2023.**

El Sujeto Regulado que no presente su Programa para el Cumplimiento en el periodo señalado, se sujetará a los plazos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 13. Los plazos que se establezcan en el Cronograma de Actividades para el seguimiento de las acciones comprometidas en los Programas para el Cumplimiento **no deberán rebasar el 11 de marzo de 2027.**

Artículo 15. La CONAGUA realizará revisiones aleatorias a los Programas para el Cumplimiento, podrá solicitar al Sujeto Regulado, las aclaraciones o información adicional que considere necesarias. En el supuesto de que el Sujeto Regulado no atienda el requerimiento de información dentro de los veinte días hábiles siguientes, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y será aplicable lo establecido en el Artículo 2º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 16. Una vez registrado el Programa ante la CONAGUA, no será objeto de modificación, salvo en el caso que el Sujeto Regulado justifique la necesidad de realizar algún cambio y no exceda el plazo originalmente establecido.

Artículo 17. El Sujeto Regulado debe presentar **dentro de los primeros cinco días hábiles de los meses de marzo y septiembre de cada año**, a partir de la fecha del registro, el avance de actividades mediante la carga de información que solicite el Sistema de Gestión en el apartado correspondiente al Informe de Avance del Programa para el Cumplimiento. Cuando el Sujeto Regulado no envíe en tiempo y forma la información del Informe de Avance, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y se aplicarán las disposiciones de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 21. La CONAGUA procederá a cancelar el Programa para el Cumplimiento y su registro, cuando compruebe que el Sujeto Regulado no ha cumplido con lo comprometido en el programa registrado. La CONAGUA, procederá a notificar la cancelación del Programa, por lo que quedarán sin efectos las acciones de cumplimiento propuestas por el Sujeto Regulado en su respectivo Programa, aplicándose las disposiciones correspondientes de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 22. Cuando las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento presentado impliquen la suspensión de sus procesos productivos y actividades para llevar a cabo las acciones tendientes a la conversión de procesos productivos o la instalación de maquinaria, equipos o plantas que se requieran para el cumplimiento de los parámetros y límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, y deba quedar fuera de operación el sistema de tratamiento de aguas residuales, el Sujeto Regulado deberá dar aviso a la CONAGUA, al menos 30 días hábiles antes de que esto ocurra, e indicar el periodo por el que prevalecerá dicha situación, el cual **no deberá exceder de tres meses**, y podrá presentarse **hasta un máximo de dos ocasiones** durante la vigencia del Programa.

De llevar a cabo la suspensión de sus procesos de tratamiento de aguas residuales sin el aviso correspondiente se aplicarán las sanciones previstas. Una vez recibida la solicitud, el Sistema de Gestión emitirá el comprobante que acreditará que la solicitud fue hecha en tiempo y forma.

Artículo 23. En caso de incumplimiento a los compromisos establecidos en el Programa para el Cumplimiento, quedan sin efecto las prerrogativas que ampara dicho documento, por lo cual el Sujeto Regulado será acreedor a las sanciones que correspondan y, en su caso, estará obligado a efectuar el pago de los derechos por el uso y aprovechamiento de cuerpos receptores de descargas de aguas residuales propiedad de la nación, a partir de la fecha del incumplimiento, así como de aquéllos que se hubieren generado con anterioridad, con sus accesorios, conforme a la LFD vigente.

Programa de inversión anual

Como se mencionó anteriormente, el monto de inversión total del Plan de Acciones es de 88.15 millones de pesos (mdp), inversión a realizarse en 5 años a partir del año 2023 hasta marzo del 2027, acorde al plazo previsto en los Lineamiento que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el presente apartado se muestra el desglose anual del Plan de Acciones, donde se describe el monto de inversión por año y unidad de proceso y/o componente del proyecto programado, así como los importes anuales y acumulados y su porcentaje de participación en la inversión.

Tabla 20:
Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
A	Proyecto ejecutivo	1.35	0.00	0.00	0.00	0.00	1.35
		100.0 %	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
B	Cárcamo, regulación, pretratamiento, y/o tratamiento primario	0.00	6.43	4.29	0.00	0.00	10.72
		0.0%	60.0%	40.0%	0.0%	0.0%	100.0%
C	Tren de tratamiento de agua	8.97	8.97	0.00	0.00	0.00	17.94
		50.0%	50.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
D	Tratamiento terciario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
E	Tren de tratamiento de lodos	0.00	11.07	11.07	0.00	0.00	22.14
		0.0%	50.0%	50.0%	0.0%	0.0%	100.0%
F	Cogeneración (y/o paneles solares)	0.00	0.00	0.00	6.72	1.68	8.40
		0.0%	0.0%	0.0%	80.0%	20.0%	100.0%

Clav e	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
G	Equipo menor	0.71	1.81	1.05	0.46	0.11	4.14
		17.0%	43.7%	25.4%	11.1%	2.8%	100.0%
H	Terracerías, vialidades y patios	0.40	1.04	0.60	0.26	0.07	2.37
		17.0%	43.7%	25.4%	11.1%	2.8%	100.0%
I	Obra eléctrica	1.51	3.88	2.25	0.99	0.25	8.88
		17.0%	43.7%	25.4%	11.1%	2.8%	100.0%
J	Automatización	0.30	0.78	0.45	0.20	0.05	1.78
		17.0%	43.7%	25.4%	11.1%	2.8%	100.0%
K	Imprevistos y contingencias	1.21	3.11	1.80	0.79	0.20	7.10
		17.0%	43.7%	25.4%	11.1%	2.8%	100.0%
L	Supervisión	0.50	1.28	0.74	0.33	0.08	2.94
		17.0%	43.7%	25.4%	11.1%	2.8%	100.0%
M	Capacitación	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.40
		0.0%	50.0%	50.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	Total Anual y Gran total, mdp's	14.95	38.56	22.46	9.74	2.43	88.15
	Acumulado anual, mdp's	14.95	53.52	75.97	85.71	88.15	
	Total Anual y Gran total, %	17.0%	43.7%	25.5%	11.0%	2.8%	100%
	Acumulado anual, %	17.0%	60.7%	86.2%	97.2%	100.0%	

A continuación, se muestra de manera gráfica el monto de inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR:

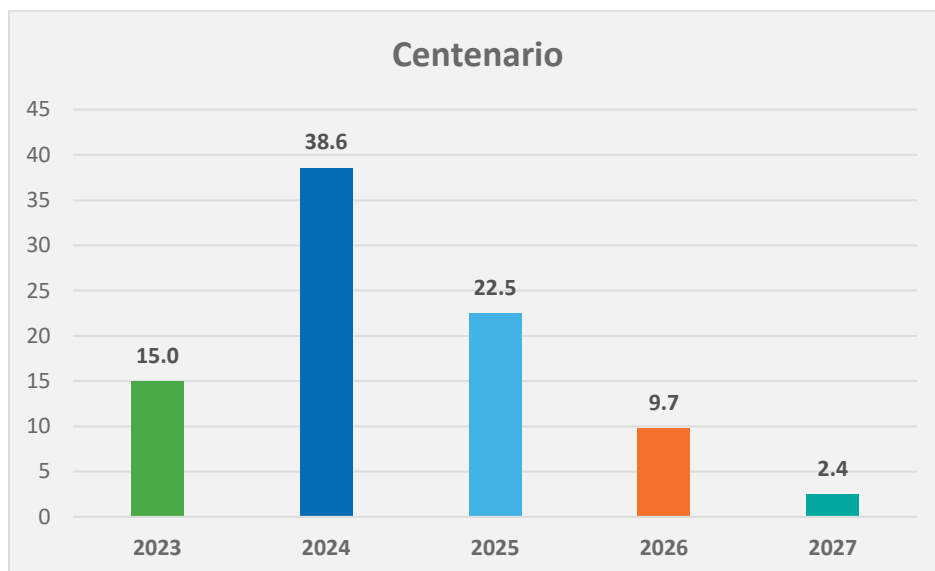


Figura 28 Inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR

Bibliografía

CONAGUA. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. . México: CONAGUA.

GIZ, C. A. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Mexico: GIZ.

Metcalf & Eddy / AECOM. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. NY: McGraw-Hill.

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4a ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.

US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR El Rey

Contenido

PTAR El Rey	1
Contenido	4
Índice de Tablas	5
Índice de Figuras	7
1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más	9
Descripción general de la PTAR El Rey	9
Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases	10
Descripción general del proceso	10
Diagrama de flujo de proceso	12
Descripción de las unidades de proceso	13
Tren de Tratamiento de Agua	13
Tren de Tratamiento de Lodos	22
Estado de conservación y operación de las instalaciones.....	28
Análisis de calidad del agua cruda.....	30
Calidad de agua cruda, histórica	30
Calidad de agua cruda, de este Estudio	31
Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada.....	34
Calidad de agua tratada, histórica.....	34
Calidad de agua tratada, de este Estudio	36
Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua histórica y del presente estudio	38
Parámetros de operación del reactor de lodos activados	39
Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua	

.....	40
Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR	41
Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) de cada planta	41
Estimación de los costos de operación y mantenimiento	43
Observaciones y recomendaciones generales	47
2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	49
Plantas de tratamiento de agua residual de Fonatur.....	49
PTAR El Rey.....	49
3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	55
Techo financiero	55
Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales	57
Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares	61
Resumen de inversión, techo financiero.....	65
4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	69
Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	69
Aspectos Clave de los Lineamientos	70
Programa de inversión anual	73
Bibliografía.....	76

Índice de Tablas

Tabla 1: Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR El Rey.....	14
Tabla 2: Dimensiones Clarificadores Secundarios PTAR El Rey.....	14

Tabla 3: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua	21
Tabla 4: Dimensiones Digestor de Lodos PTAR El Rey	22
Tabla 5: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo	25
Tabla 6: Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)	31
Tabla 7: Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente	33
Tabla 8: Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)	34
Tabla 9: Caracterización del agua tratada de este Estudio (<i>E.coli</i> y Huevos de helminto)	37
Tabla 10: Cumplimiento del agua tratada	38
Tabla 11: Sólidos sedimentables en reactor de lodos activados PTAR El Rey	39
Tabla 12: Coordinada de pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR	40
Tabla 13: Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales	43
Tabla 14: Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M.	45
Tabla 15: Resumen de las acciones propuestas para la PTAR El Rey	50
Tabla 16: Descripción de las acciones propuestas para la PTAR El Rey	51
Tabla 17: Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio	56
Tabla 18: Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	65
Tabla 19: Monto de inversión, millones de pesos.....	67
Tabla 20: Estimación detallada de costos PTAR El Rey	67
Tabla 21: Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado	73

Índice de Figuras

Figura 1 Vista Aérea PTAR El Rey.....	9
Figura 2 Diagrama de flujo de proceso actual PTAR El Rey.....	12
Figura 3 Arreglo general de unidades de la PTAR El Rey.....	16
Figura 4 Cárcamo final de agua cruda y vista superior del desarenador	17
Figura 5 Desarenador y canal de medición de caudal y de cribado medio de limpieza manual	17
Figura 6 Sedimentador primario y bombas de lodos primarios.....	17
Figura 7 Ingreso de agua pretratada al reactor y vista general del reactor de los reactores de lodos activados	18
Figura 8 Vista de reactor de lodos activados y sección final del reactor, salida de licor mezclado a clarificación secundaria	18
Figura 9 Bombas de recirculación y purga de lodo secundario, línea de recirculación de lodo a sección inicial del reactor	18
Figura 10 Clarificador secundario 1 y clarificador secundario 2, fuera de operación.....	19
Figura 11 Caseta de cloración y sistema de generación de hipoclorito, fuera de operación ..	19
Figura 12 Línea de agua tratada para servicios internos; y cisterna de agua tratada y equipos de bombeo para reúso externo.....	19
Figura 13 Pozo 2 de infiltración de agua tratada, y pozo 3 de infiltración de agua tratada	20
Figura 14 Digestor aerobio de lodos	23
Figura 15 Digestor de lodo en fase de decantación y bombas de lodo digerido a desaguado	24
Figura 16 Filtro banda en operación de desaguado	24
Figura 17 Preparador de Polímero con Filtro Banda y Caseta de Desaguado de Lodo	24
Figura 18 Caracterización del agua cruda (sep-2022)	33
Figura 19 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021).....	35
Figura 20 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT).....	36
Figura 21 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro	

residual y Toxicidad aguda)	37
Figura 22 Prueba de Sólidos Sedimentables PTAR El Rey	39
Figura 23 Pozos de infiltración PTAR El Rey	40
Figura 24 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m ³	46
Figura 25 Vista actual de la PTAR El Rey.....	49
Figura 26 Diagrama de flujo de la PTAR El Rey con las acciones propuestas	54
Figura 27 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	66
Figura 28 Inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR.....	75

1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más

Descripción general de la PTAR El Rey

La PTAR el Rey se localiza en la Zona Hotelera de Cancún y proporciona el servicio de tratamiento al agua residual de origen municipal y de los usos comercial, servicios y hotelero generadas en su zona de servicio, que corresponde a la zona sur de la zona hotelera. FONATUR es responsable de la operación y mantenimiento de la PTAR, así como del fondeo y/o obtención de los recursos económicos requeridos para su ampliación, modernización, rehabilitación y sustitución de equipos.



Figura 1 Vista Aérea PTAR El Rey

Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases

La PTAR El Rey se construyó en el año 1984 y tiene capacidad nominal para un caudal medio de 100 L/s, la información de FONATUR indica que el caudal medio tratado en el año 2021 fue de 70 L/s. La planta cuenta con un terreno aledaño con superficie de 2,500 m² como reserva para ampliaciones futuras.

A continuación, se indican las operaciones y procesos que conforman el tren de tratamiento de la PTAR El Rey, el valor entre paréntesis indica el número de unidades:

Tren de tratamiento de agua:

- + Cárcamo final (1)
- + Pretratamiento manual: cribado (2), desarenado vórtex (1), no opera
- + Sedimentación primaria (2), no operan
- + Reactor de lodos activados (2), aireación mecánica
- + Clarificación secundaria (2), 1 no operaba (en octubre inició operación)
- + Desinfección con gas cloro, tanque de contacto de cloro (1)
- + Cisterna y bombeo de agua tratada para reúso (2)
- + Pozos de infiltración de agua tratada (3)

Tren de tratamiento de lodos:

- + Sin operación específica espesamiento, el lodo se espesa por decantación dentro del digestor
- + Digestión aerobia, aireación mecánica (1)
- + Desaguado mecánico, en filtro banda (1)

El lodo desaguado se trasporta en camiones hacia la estación central de composteo de FONATUR junto con los residuos orgánicos de las áreas verdes comunes de la zona hotelera.

Descripción general del proceso

El agua residual ingresa al cárcamo final dentro de la PTAR El Rey desde donde se bombea hacia la plataforma de pretratamiento. El pretratamiento se compone de un desarenador cónico seguido de dos rejillas de cribado grueso en paralelo. El final del pretratamiento se realiza la medición de caudal influente por medio de un canal Parshall.

En el esquema de tratamiento inicial de la planta, el agua pretratada se dirigía hacia los dos sedimentadores primarios existentes. Actualmente, ambos sedimentadores fueron removidos de la operación y se encuentran abandonados. En su lugar, el agua pretratada

ingresa directamente hacia alguno de los dos reactores de lodos activados.

El reactor de lodos activados es de tipo mezcla completa para la remoción de materia orgánica carbonácea. El ingreso de aire para el proceso se realiza por medio de 6 aireadores mecánicos superficiales instalados sobre los puentes de operación. Tras el proceso, el licor mezclado se conduce hacia el clarificador secundario, donde se separa la biomasa del agua.

La PTAR cuenta con dos clarificadores secundarios instalados de diferente tamaño. Desde esta unidad se realiza el retorno de lodos a los reactores y la purga de lodo. El agua tratada se dirige finalmente hacia el tanque de contacto de cloro, que se encuentra tapado por completo, donde se realiza la desinfección con cloro gas.

El agua tratada se dirige hacia una cisterna de agua donde se realiza el bombeo para el riego de las áreas verdes del boulevard Kukulkán. Esta cisterna puede recibir agua también de la PTAR Gucumatz, como refuerzo de riego.

Los lodos producidos por la planta se dirigen hacia el digestor aerobio de lodos. El tanque digestor cuenta con arreglos hidráulicos suficientes para lograr espesar el lodo dentro de la misma unidad, mediante paros programados en la aireación y decantación del sobrenadante. El lodo digerido es enviado a desaguado a un equipo de filtro banda y de ahí alimentado a camiones góndolas para su disposición en terrenos de FONATUR.

Diagrama de flujo de proceso

Para facilitar la comprensión de los procesos de tratamiento, más adelante, en la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo simplificado del proceso actual de tratamiento de agua y lodos.

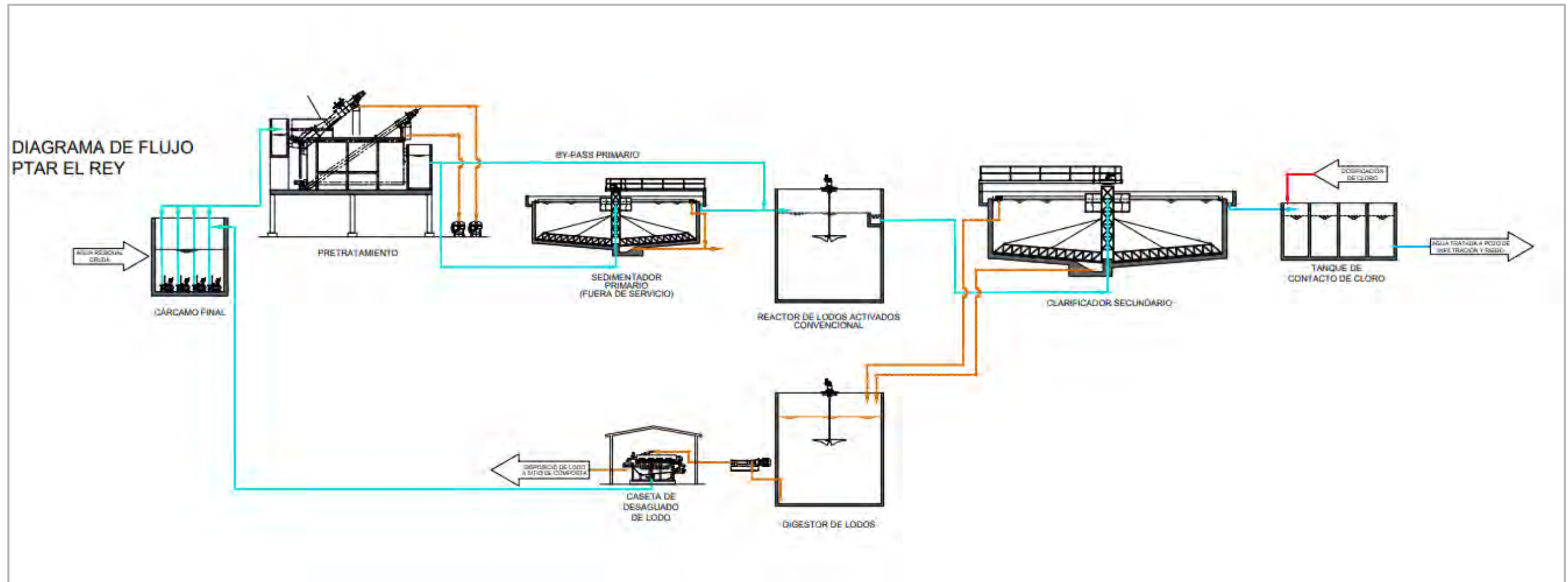


Figura 2 Diagrama de flujo de proceso actual PTAR El Rey

Descripción de las unidades de proceso

Como parte del trabajo de campo elaborado en este Estudio, se recopiló información sobre las características, dimensiones y condiciones de operación y mantenimiento de las unidades de proceso de la PTAR. Las características de estas unidades y funcionamiento se comentan más adelante.

Tren de Tratamiento de Agua

Cárcamo de bombeo

El agua residual ingresa a la PTAR desde el emisor principal hacia el cárcamo de bombeo final (Figura 4). En el ingreso al cárcamo final se cuenta con reja de desbaste de limpieza manual. El cárcamo de bombeo tiene posibilidad de recibir agua residual procedente del cárcamo final de la PTAR Gucumatz.

El cabezal de bombeo cuenta con capacidad para la instalación de hasta tres bombas sumergibles, de las cuales al momento de la visita se encontraban solamente dos instaladas. Debido a la falta de un equipo adicional de bombeo, la PTAR presenta dificultades para manejar los caudales picos.

Pretratamiento

El pretratamiento se compone por un desarenador cónico seguido de dos cribas gruesas y un canal Parshall (Figura 4 y Figura 5). El pretratamiento es relativamente pequeño para el caudal que se maneja. Esto limita la cantidad de arena y basuras retenidas y puede propiciar su acumulación en el reactor de lodos activados o digestor. Los residuos son recolectados de manera manual y no cuenta con un clasificador/lavador de arena ni compactador de cribados.

Sedimentación primaria

La planta cuenta con dos sedimentadores primarios, aunque ambos llevan años fuera de operación, lo que se evidencia en el estado de la infraestructura (Figura 6). Las rastras, vertedores, e internos del sedimentador se encuentran severamente deteriorados. Algunos de los motores de esta área siguen instalados y otros han sido retirados para complementar necesidades en otras zonas o PTAR. De acuerdo con el personal de operación, los sedimentadores primarios fueron retirados de operación debido a problemas de olor.

Reactores de lodos activados

Dos reactores de lodos activados dan servicio a la planta (Figura 7 y Figura 8). Cada reactor cuenta con tres aireadores mecánicos superficiales de puente fijo y alta velocidad. De los 6 equipos, uno se encontraba fuera de operación al momento de la visita. Los aireadores mecánicos son equipos de tecnología obsoleta e ineficiente, generadora de aerosoles.

Las mamparas y vertedores de los reactores de lodos activados se encuentran deterioradas e incompletas. La línea de recirculación de lodo está diseñada para poder alimentar cualquiera de los reactores desde cualquiera de los clarificadores secundarios (Figura 9).

Las dimensiones de los reactores se presentan en la Tabla 1

Tabla 1:
Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR El Rey

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	1
Largo	m	35.0
Ancho	m	25.0
Tirante hidráulico	m	3.9
Volumen total	m ³	3,412

Clarificador secundario

La planta cuenta con dos clarificadores secundarios con rastras de tracción perimetral. Aunque al momento de la visita uno de los clarificadores se encontraba fuera de operación, en el mes de octubre se sustituyeron las tornamesas, rastras e internos de ambos clarificadores y ya se encuentran en operación las dos unidades. En total FONATUR invirtió un monto de 4 millones de pesos en estas obras. Las dimensiones del clarificador secundario se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2:
Dimensiones Clarificadores Secundarios PTAR El Rey

Concepto	Unidad	Clarificador A	Clarificador B
Número de unidades	No.	1	1
Diámetro	m	15.0	18.0
Área	m ²	176.7	254.5
Tirante hidráulico, SWD	m	3.5	3.5
Volumen total	m ³	618.5	890.6

La recirculación de lodo secundario se efectúa desde los clarificadores por un cárcamo tipo seco, con dos bombas tipo centrífuga (Figura 9).

Desinfección

La PTAR cuenta con sistema de generación de hipoclorito in situ, mismo que está fuera de operación desde hace varios años (Figura 11). El personal de operación reporta que no logró el desempeño esperado, debido a problemas en la calidad del agua de suministro y el tipo y calidad de la sal a utilizar.

Actualmente la desinfección, se efectúa con solución de cloro líquido a presión, almacenado en tanques de 1 tonelada (Figura 11). En la visita se observaron tres tanques de almacenamiento, junto con grúa para izaje. Los tanques son sostenidos por tablas y no cuentan con báscula para el seguimiento del consumo de cloro.

El tanque de contacto de cloro se encuentra tapado en su totalidad, por lo que no puede observarse a su interior. Sobre este tanque está instalada la caseta de dosificación de cloro, de tipo abierta, con el sistema de generación de hipoclorito y parte del sistema de gas cloro. El gas cloro se dosifica mediante un clorinador rotámetro instalado directamente en el tanque de cloro en servicio. Aunque cuenta con sensor de fugas de gas cloro, se desconoce si funciona.

Disposición y aprovechamiento de agua tratada

El agua tratada y desinfectada tiene como destino alguno de los tres pozos de infiltración de la planta, de los cuales dos se encuentran en operación, ambos con medidor totalizador de flujo (Figura 13). Alternativamente, el agua tratada se utiliza para regar áreas verdes del boulevard Kukulcán o para abastecer las redes de riego de hoteles cercanos. Los equipos de bombeo se encuentran

Desde el tanque de contacto de cloro se alimentan dos cisternas de agua tratada, cada uno con baterías de bombas distintas para abastecer los servicios de riego (Figura 12):

Cisterna de agua tratada 1, para los servicios de la propia planta, y para el bombeo de agua tratada al campo de golf Iberostar y para el Club Med, con equipo de bombeo para reforzar la cisterna principal.

Cisterna de agua tratada 2, con equipos de bombeo de agua tratada para riego de camellón y para envío de agua tratada al Moon Palace (ya no se le suministra agua tratada). La cisterna de agua tratada 2 tiene además una línea de refuerzo con suministro de agua tratada proveniente de PTAR Gucumatx.

El agua tratada también se utiliza también para las líneas de servicio internas, estas cuentan con filtros marca Amiad.

Vistas del tren de tratamiento de agua

En la Figura 3 se presenta una vista del arreglo general de unidades de la PTAR El Rey presentando todas las unidades principales de proceso salvo la cisterna y bombeo de agua tratada para reúso externo. Posteriormente, de la Figura 4 a la Figura 13 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de agua de la PTAR.



Figura 3 Arreglo general de unidades de la PTAR El Rey



Figura 4 Cárcamo final de agua cruda y vista superior del desarenador



Figura 5 Desarenador y canal de medición de caudal y de cribado medio de limpieza manual



Figura 6 Sedimentador primario y bombas de lodos primarios



Figura 7 Ingreso de agua pretratada al reactor y vista general del reactor de los reactores de lodos activados



Figura 8 Vista de reactor de lodos activados y sección final del reactor, salida de licor mezclado a clarificación secundaria



Figura 9 Bombas de recirculación y purga de lodo secundario, línea de recirculación de lodo a sección inicial del reactor



Figura 10 Clarificador secundario 1 y clarificador secundario 2, fuera de operación

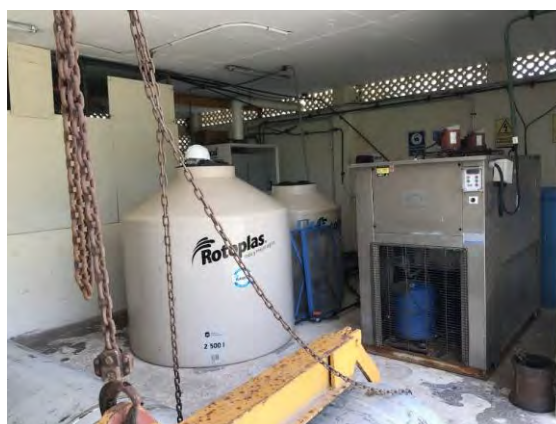


Figura 11 Caseta de cloración y sistema de generación de hipoclorito, fuera de operación



Figura 12 Línea de agua tratada para servicios internos; y cisterna de agua tratada y equipos de bombeo para reúso externo



Figura 13 Pozo 2 de infiltración de agua tratada, y pozo 3 de infiltración de agua tratada

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua

Con el fin de verificar que las principales estructuras de proceso del tren de tratamiento de agua sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes en el agua cruda, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para tal efecto se utilizaron las dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior, los datos de caudal y calidad de agua cruda utilizados son los siguientes:

- + Caudal medio de diseño 100 L/s
- + Calidad de agua cruda promedio (histórico)
- + DBO, 131 mg/L
- + SST, 131 mg/L

En la Tabla 3 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de agua, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR El Rey con las dimensiones de las estructuras, en caso de no contar con algún dato de operación se asignó un valor promedio del rango típico.

Tabla 3:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor
Reactor de Lodos Activados			
Concentración de DBO influente al reactor	mg/L	No aplica	131
Concentración de SSTLM	mg/L	3,000 - 4,000	3,500
Fracción volátil		0.7 a 0.8	0.75
Relación F/M	kg/kg - d	0.2 a 0.6	0.13
Carga volumétrica	KgDBO/m ³ - d	0.3 a 1.6	0.33
Tiempo hidráulico de retención total	horas	5 a 15	9.5
Tiempo hidráulico de retención zona anóxica	horas	1 a 3	0
Tirante hidráulico	m	4.5 a 7.5	3.9
Clarificador Secundario			
Carga hidráulica superficial, Caudal medio	m ³ /m ² -d	16 a 28	20 (entre ambos clarificadores)
Recirculación	%	25 a 100%	100%
Carga de sólidos, Caudal medio	Kg/m ² - h	4 a 6	5.8
Tirante hidráulico	m	4 a 5	4
Tanque de contacto de cloro			
Tiempo hidráulico de retención	min	30	Sin datos

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

La concentración promedio de DBO influente a la PTAR El Rey, así como a las otras PTAR de FONATUR, es relativamente baja. Es decir, el agua influente se encuentra significativamente diluida. Esto implica que las limitantes de proceso se deben a las condiciones hidráulicas más que a las cargas orgánicas.

Debido a la baja carga orgánica influente, el reactor de lodos activados, a pesar de no contar con sedimentación primaria, se encuentra sobrado para su capacidad actual. Esto al presentar una COV y F/M cercanos al rango inferior recomendado.

Entre ambos clarificadores secundarios, se tiene suficiente superficie para manejar el caudal influente a la PTAR. Un solo clarificador secundario no es suficiente para manejar el caudal influente a la PTAR, lo que es una de las causas de la flotación de sólidos observada durante la visita.

El uso de aireadores mecánicos superficiales es poco eficiente energéticamente, siendo necesario evaluar la inclusión de aireación difusa.

La PTAR no cuenta con la infraestructura suficiente ni la modalidad de operación para remover nitrógeno y dar cumplimiento a la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021.

Tren de Tratamiento de Lodos

Digestor aerobio de lodo

El lodo por purgar es conducido desde el clarificador secundario hacia el digestor aerobio de lodos. La purga de lodo se realiza mediante la misma batería de bombas que la recirculación de lodo (Figura 9), cambiando la apertura de válvulas para cambiar la dirección del fluido. Las natas secundarias, son bombeadas también y enviadas a la digestión.

El digestor de lodos cuenta con dos aireadores mecánicos superficiales montados sobre el puente de operación. Las dimensiones del digestor se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4:
Dimensiones Digestor de Lodos PTAR El Rey

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	1
Largo	m	20.0
Ancho	m	10.0
Tirante hidráulico	m	3.9
Volumen total	m ³	780

El espesado de lodo secundario se efectúa por medio de decantación dentro del propio digestor de

lodos. Durante la visita el digestor se encontraba en este proceso, por lo que se observan apagados los equipos de aireación (Figura 14 y Figura 15). El lodo digerido es bombeado por medio de dos bombas de desplazamiento positivo hacia la caseta de desaguado.

Desaguado de lodo

El desaguado de lodo digerido se efectúa con un filtro banda con 1.5 metros de longitud de ancho de banda. Durante la visita se encontraba en funcionamiento (Figura 16), el lodo se acumula en la tolva, esperando la llegada de la góndola para retirarlos.

Se cuenta con una central de preparación y dosificación de polímero hechiza, que se abastece de agua de la red de servicio de la PTAR (Figura 17). De acuerdo con el personal el desaguado funciona de 20 a 24 h al día, los 7 días de la semana. Se prepara hasta un tanque de polímero, de 1,200 L, cada turno.

Otros

Planta de energía eléctrica de emergencia, cuenta con un equipo con capacidad para 750 kilowatts, misma que no está operativa, requiere sustitución por equipo nuevo.

Vistas del tren de tratamiento de lodo

De la Figura 14 a la Figura 17 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de lodo de la PTAR.



Figura 14 Digestor aerobio de lodos



Figura 15 Digestor de lodo en fase de decantación y bombas de lodo digerido a desaguado



Figura 16 Filtro banda en operación de desaguado



Figura 17 Preparador de Polímero con Filtro Banda y Caseta de Desaguado de Lodo

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de lodo

Con el fin de verificar que las principales estructuras y equipos de proceso del tren de tratamiento de lodo sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño más relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para esta evaluación se consideraron las siguientes premisas de cálculo:

Dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior

Producción de lodos, se estimó con base en la fórmula simplificada de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) con los datos de caudal medio de diseño y calidad de agua cruda promedio del histórico (SST y DBO), mismos que se utilizaron para la evaluación del tren de agua (US EPA, 1993).

Para determinar el volumen de lodos se utilizaron las concentraciones típicas esperadas en la purga de lodo secundario.

De manera conservadora, se consideró que los equipos mecánicos de desaguado operan en el rango menor indicado por el personal de operación, es decir 7 días a la semana, 20 horas al día.

En la Tabla 5 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de lodo, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR con las dimensiones de las estructuras y capacidades de equipos. En caso de no contar con algún dato de operación se consideró un valor promedio del rango típico.

Tabla 5:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR
Producción de lodo			
Producción de lodo esperada	kg SST /día	No aplica	1,019
Concentración		0.5 a 1.5%	0.70%
Flujo volumétrico	m ³ /día	No aplica	146
Digestión Aerobia de lodo			
Concentración de espesado en tanque	%		1.5%

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR
Volumen de lodo alimentado equivalente	m ³ /día		67.6
Tiempo de retención hidráulico (edad de lodo)	días		11.5
Carga de sólidos volátiles	kgSSV/m ³ -d	1.6 a 4.8	1
Destrucción esperada		38 a 50%	38%
Masa de lodo digerido estimada	kg SST /día		728.3
Desaguado de Lodo (centrífuga)			
Días de operación por semana			7
Horas de operación por día			20
Ancho de banda	m	1 a 3	1.5
Carga de sólidos (por metro)	kg/h	250 a 410	24
Carga hidráulica (por metro)	L/min	150 a 340	37.5
Porcentaje de captura		90 a 98%	95%
Concentración de lodo espesado esperada		12 a 22%	18.0%
Volumen de lodo desaguado	m ³ /día		5.1
Masa de lodo desaguado estimada	kg SST/día		692

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + El espesado de lodo influye fuertemente en el desempeño de la digestión y el desaguado de

lodos posterior. A una concentración de 1.5% de lodo espesado, la edad de lodo en el digestor sería de 11.5 días, que es menor que la recomendada por la literatura de 15 a 20 días. Conseguir una edad de lodo adecuada en el reactor depende de una labor operativa detallada para mantener la concentración de sólidos en el digestor, de lo contrario se arriesga a no cumplir con la destrucción de SSV objetivo por norma.

- + Al tiempo de operación mencionado por el personal de la planta, el filtro banda opera holgado y con cargas de sólidos e hidráulicas menores a las normales. Dado que para la evaluación se partió de estimados de producción de lodo y concentración, este escenario puede deberse a dos razones:
 - El tiempo de operación del filtro banda es en realidad menor. Sea en horas al día o días a la semana.
 - La concentración alimentada al filtro banda es menor, por lo que la limitante en el filtro banda se debe a la carga hidráulica.
- + En todo caso, una unidad de espesado de lodos formal disminuiría la complejidad de operación del digestor además de aumentar su desempeño y el del desaguado.

Estado de conservación y operación de las instalaciones

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de agua de la PTAR El Rey, evaluadas con base en el cumplimiento de la NOM-001-2021 para suelo cárstico en DQO, SST, NT y PT con el promedio histórico de calidad de agua, se clasifican como **“Buenas”**. En la sección **Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada**, se presenta la evaluación de dicha información.

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de lodos, determinadas con base en las condiciones operativas y de desempeño de las operaciones de espesado, digestión y desaguado observadas en la visita, se clasifican como **“Regulares”**. En términos generales las condiciones de mantenimiento de los trenes de tratamiento de agua y de lodos se consideran **“Regulares”**. En los párrafos subsecuentes se describe lo observado en la visita técnica efectuada a la PTAR.

La PTAR El Rey es una instalación de tratamiento vieja con 38 años en operación, a partir del año 1984. El diseño de sus operaciones y procesos, así como las dimensiones y características físicas de las unidades responden a criterios, prácticas y objetivos de tratamiento obsoletos o que ya no son aplicables, destacando los siguientes aspectos:

- + Cribado de desbaste y en pretratamiento de operación manual
- + Aireación mecánica en los reactores de lodos activados
- + Bajo tirante hidráulico en los reactores de lodos activados
- + Baja profundidad de pared lateral en los clarificadores secundarios
- + Caseta de cloración abierta
- + Carencia de espesado de lodos
- + Volumen insuficiente en el digestor aerobio de lodos
- + Aireación mecánica en el digestor aerobio de lodos

Adicional a lo anterior, en la visita de campo se observaron los problemas e insuficiencias que a continuación se indican:

- + Equipos de bombeo del cárcamo de agua cruda y del pretratamiento sin capacidad con para manejar los caudales picos horarios.
- + Los sedimentadores primarios están fuera de operación y con deterioro severo del equipamiento mecánico e internos de los tanques. El personal de la planta menciona que los sedimentadores “nunca” han operado.
- + Un clarificador secundario esta fuera de operación, por daños al tornamesa y equipo motriz ocasionados hace varios años por un huracán.
- + El tanque de contacto de cloro está cubierto por losa de concreto, lo que impide su inspección y dificulta las labores de mantenimiento.
- + Carencia de equipo de monitoreo y manejo seguro del gas cloro, almacenado en tanques de 908 kg.

Con respecto al equipamiento mecánico existente se observa lo que a continuación se describe:

- + El equipo desarenador, además de no tener respaldo, está muy deteriorado y con operación deficiente, incluido el retiro y manejo de la arena.
- + El arreglo de las diversas tuberías de agua pretratada, by pass y recirculación de lodos se observa complejo y, al parecer, con capacidad insuficiente para conducir caudales pico.
- + Las rastras, tornamesas e internos de los clarificadores secundarios registran condiciones moderadas de deterioro.
- + El cárcamo de agua cruda tiene solo dos equipos de bombeo instalados y operando, se requiere el tercer equipo, y asegurar la capacidad requerida para el caudal pico horario.
- + Los equipos de bombeo de agua para reúso por Fonatur y usuarios privados se observan deteriorados, requieren sustituirse por equipos con mejor desempeño y eficiencia energética.
- + Los equipos de bombeo del tren de lodos (recirculación y purga, natas secundarias y lodo digerido), aunque todos están operativos y con adecuado mantenimiento, son equipos que requieren ser sustituidos a corto/mediano plazo, en algunos se observa, y lo confirmo el personal, que los motores se tomaron de otros equipos y plantas.
- + Los aireadores superficiales del reactor de lodos activados y digestor de lodos muestran deterioro moderado por los años y las condiciones ambientales, requieren sustitución por nueva tecnología.
- + El sistema de preparación de polímero para desaguado de lodo requiere sustitución.
- + La planta de energía eléctrica de emergencia (de 750 kw) no está operativa, requiere sustitución.
- + El filtro banda para desaguado de lodo, si bien está en operación, muestra deterioro en sus elementos mecánicos, lo que afecta su operación y desempeño. Es muy conveniente sustituirlo.

La obra civil de tanques, edificaciones, vialidades y las áreas verdes se observan con condiciones de mantenimiento de regulares a buenas; lo mismo aplica para las diversas tuberías de conducción de agua y de lodos. Se percibe el esfuerzo del personal por mantener la planta en condiciones operativas y de aspecto aceptables, lo anterior no obstante las restricciones de recursos materiales y económicos.

La obra e instalaciones eléctricas, como son la subestación, el Centro de Control de Motores, red de fuerza y alumbrado exterior, exceptuando la planta de emergencia, se observan en condiciones adecuadas de mantenimiento. La PTAR El Rey recibirá a corto plazo (mediados de 2023) el agua residual procedente de la Tercera Etapa de la Zona Hotelera de Cancún, por lo que el proyecto ejecutivo y las obras de rehabilitación, mejora y cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021 deberán considerar dicho caudal adicional, que de manera preliminar se estima en 50 L/s.

En el Anexo 1 (Ficha de la PTAR) se presenta la descripción detallada de las características y condiciones actuales de operación y mantenimiento de las estructuras y equipos del tren de agua y lodos.

Análisis de calidad del agua cruda

Calidad de agua cruda, histórica

Se incluyen diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos, la información fue proporcionada por FONATUR, los análisis fueron efectuados por un laboratorio acreditado ante la EMA. Se proporcionaron datos de nueve muestreos efectuados en el influente durante el periodo del año 2020 al 2021, ocho de ellos de tipo simple y uno compuesto.

Los parámetros incluidos en las bases de datos de FONATUR son los siguientes:

- + Temperatura
- + pH: Potencial de hidrógeno
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos sedimentables
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)
- + Coliformes fecales
- + Huevos de helminto

Debido a que los resultados de los muestreos fueron previos a la actualización de la NOM-001-SEMARNAT-2021, las bases de datos no incluyen los parámetros adicionales de la nueva norma, como color verdadero, toxicidad y *E. Coli*, así mismo incluyen parámetros que no son objeto de estudio en la actual norma, sin embargo, si permiten determinar la calidad de los procesos de tratamiento del agua residual.

A continuación, se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR El Rey.

Tabla 6:
Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)

Concepto	pH	G & A mg/L	SST mg/L	DBO mg/L	DQO mg/L	NT mg/L	NTK mg/L	PT mg/L	Coliformes fecales NMP/100 mL
No. de datos	9	9	8	8	8	7	8	9	8
Mínimo	6.0	5.8	21	58	118	1.52	1.41	1.35	3
1° Cuartil	7.0	13.4	47	77	138	3.40	3.32	1.51	77
Promedio	7.2	17.7	144	144	295	5.03	4.61	2.32	1,066
Mediana	7.1	17.8	116	125	256	3.83	3.95	1.91	1,100
3° Cuartil	7.5	19.8	186	160	338	6.55	6.34	3.12	1,654
Máximo	8.0	29.1	358	369	743	9.95	8.14	4.02	>2,400

Calidad de agua cruda, de este Estudio

Del 26 al 27 de septiembre se efectuó un muestreo compuesto de 24 horas tanto en el influente y efluente de la PTAR El Rey, este se efectuó con seis muestras simples, a cada una de estas se les realizaron los siguientes análisis de campo:

- + pH
- + Temperatura del agua
- + Cloro residual libre (efluente)
- + Los parámetros analizados en el laboratorio fueron los siguientes:
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)

- + Escherichia coli (efluente)
- + Toxicidad Vibrio fischeri (efluente)
- + Huevos de helminto
- + Color verdadero (UV-Vis) a 436, 525 y 620 nm

Las actividades de colecta, preservación y análisis de las muestras fueron realizadas por personal de Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis (Intertek + ABC Analitic), éste cuenta con la acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA) en la rama de agua número AG-096-029/11 para su laboratorio ubicado en la ciudad de México y AG-096-029/11_S1 para el laboratorio de Mérida, que es donde se realizarán los análisis.

En todos los casos, la preservación y el almacenamiento de las muestras se efectuaron de acuerdo con los lineamientos que establece la normatividad mexicana. Las muestras colectadas fueron preservadas con hielo a una temperatura de 4°C con la intención de que no se degradaran, y fueron transportadas en una hielera al laboratorio correspondiente para su análisis.

El transporte se hizo con sumo cuidado, de tal forma que se evitaron los derrames y/o contaminación de muestras debido a rupturas de frascos o cualquier otro accidente.

Los diferentes frascos que integran las muestras se preservaron con los reactivos señalados en la normatividad.

En el Anexo 3 se presentan los resultados completos del laboratorio del influente y efluente de la PTAR El Rey.

En la Figura 18 se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR El Rey.

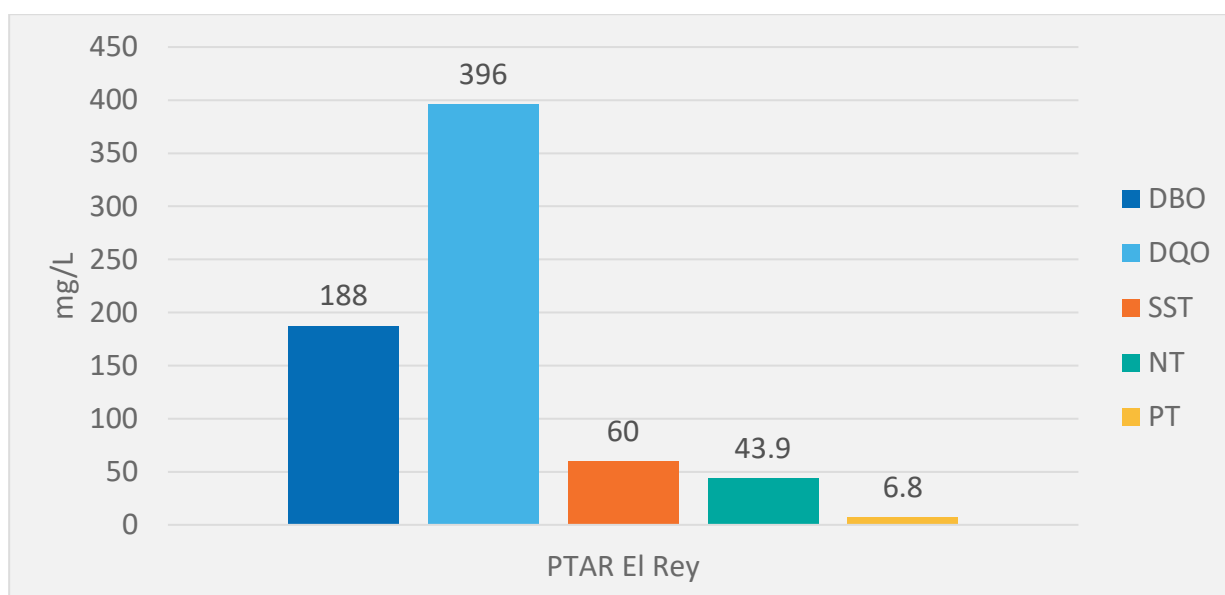


Figura 18 Caracterización del agua cruda (sep-2022)

Con la finalidad de conocer la relación de contaminantes, se realizaron los cálculos que a continuación se presentan en la siguiente tabla, los cuales fueron determinados con los promedios obtenidos anteriormente en las tablas previas.

Tabla 7:
Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente

Relación	Promedio (2020-2021)	Valor Estudio	Rango típico en Aguas Residuales Municipales ¹
DBO5/ DQO	0.44	0.47	0.45 – 0.55
SST/ DBO	0.74	0.32	0.80 – 1.20
NTK/ DBO	0.04	0.23	0.10 – 0.20
Fósforo/ DBO	0.03	0.04	0.02

¹ (US EPA, 1993)

De las relaciones anteriores resalta NTK/DBO del promedio histórico de FONATUR, el valor de NTK es muy bajo con relación a la DBO, probablemente existe un error en su determinación. En los resultados obtenidos en este estudio la relación de SST/DBO fue muy baja, el resto de las relaciones se encuentran dentro o muy cerca del rango típico de aguas residuales municipales.

Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada

En las siguientes figuras y tablas se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada del histórico de datos proporcionados por FONATUR y de los obtenidos en el presente Estudio, en estas se presentan los límites permisibles (LP) establecidos en la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelo cárstico.

Calidad de agua tratada, histórica

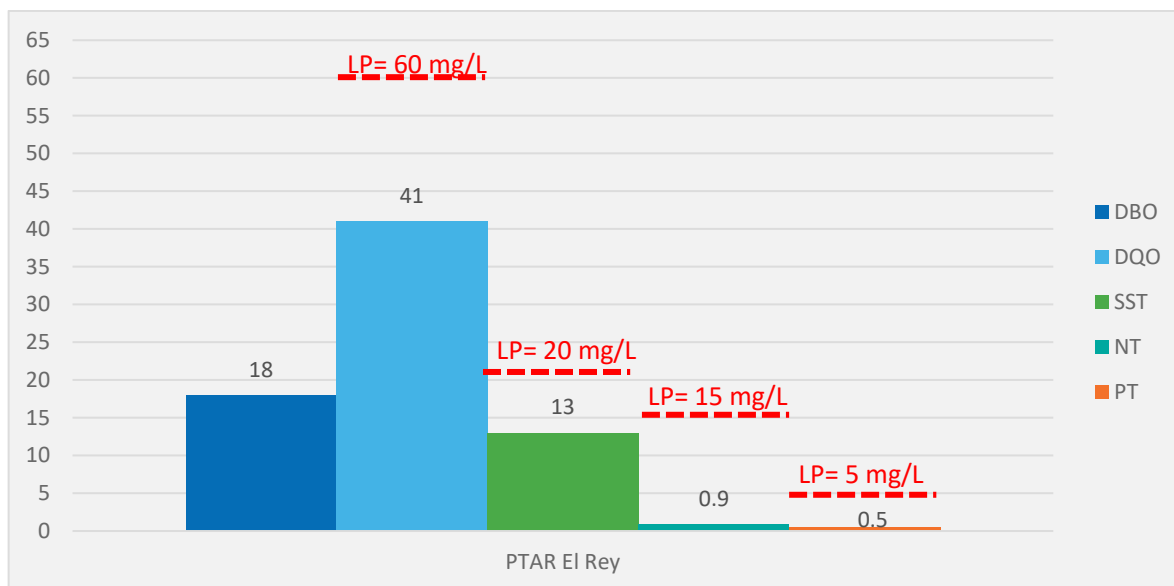
Se proporcionaron datos de 88 muestreos efectuados en el efluente durante el periodo del año 2020 al 2021, ocho de ellos de tipo simple y el resto de tipo compuesto.

En la siguiente tabla se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros en el agua tratada de la PTAR El Rey.

Tabla 8:
Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)

Concepto	G & A mg/L	SST mg/L	DBO mg/L	DQO mg/L	NT mg/L	NTK mg/L	PT mg/L	Huevos de helminto huevos/L	Coliformes fecales NMP/100 mL
No. de datos	88	88	88	88	86	88	88	88	88
Mínimo	5.0	6	8	22	0.54	0.43	0.25	0	3
1° Cuartil	5.8	7	11	31	0.63	0.63	0.30	0	8
Promedio	6.0	13	18	41	0.87	0.79	0.49	0	36
Mediana	5.8	12	16	34	0.63	0.63	0.56	0	20
3° Cuartil	6.4	17	22	46	1.08	0.96	0.56	0	45
Máximo	12.5	60	67	133	3.58	3.46	1.80	0	155

A manera de resumen en la Figura 19 se presentan los valores promedio de los principales parámetros del agua tratada de la PTAR El Rey, en esta se indican los límites permisibles (LP) para el promedio mensual en la NOM-001.

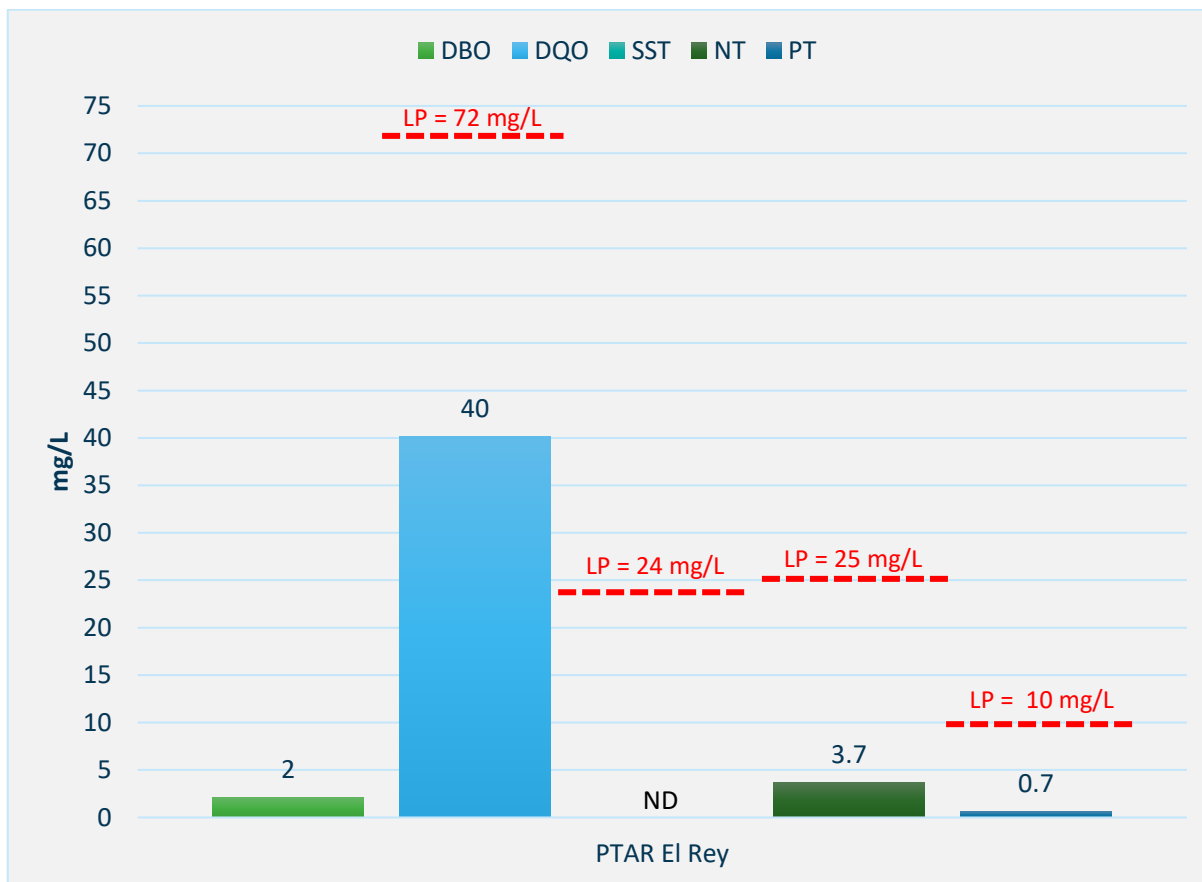


LP = Límite permisible

Figura 19 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)

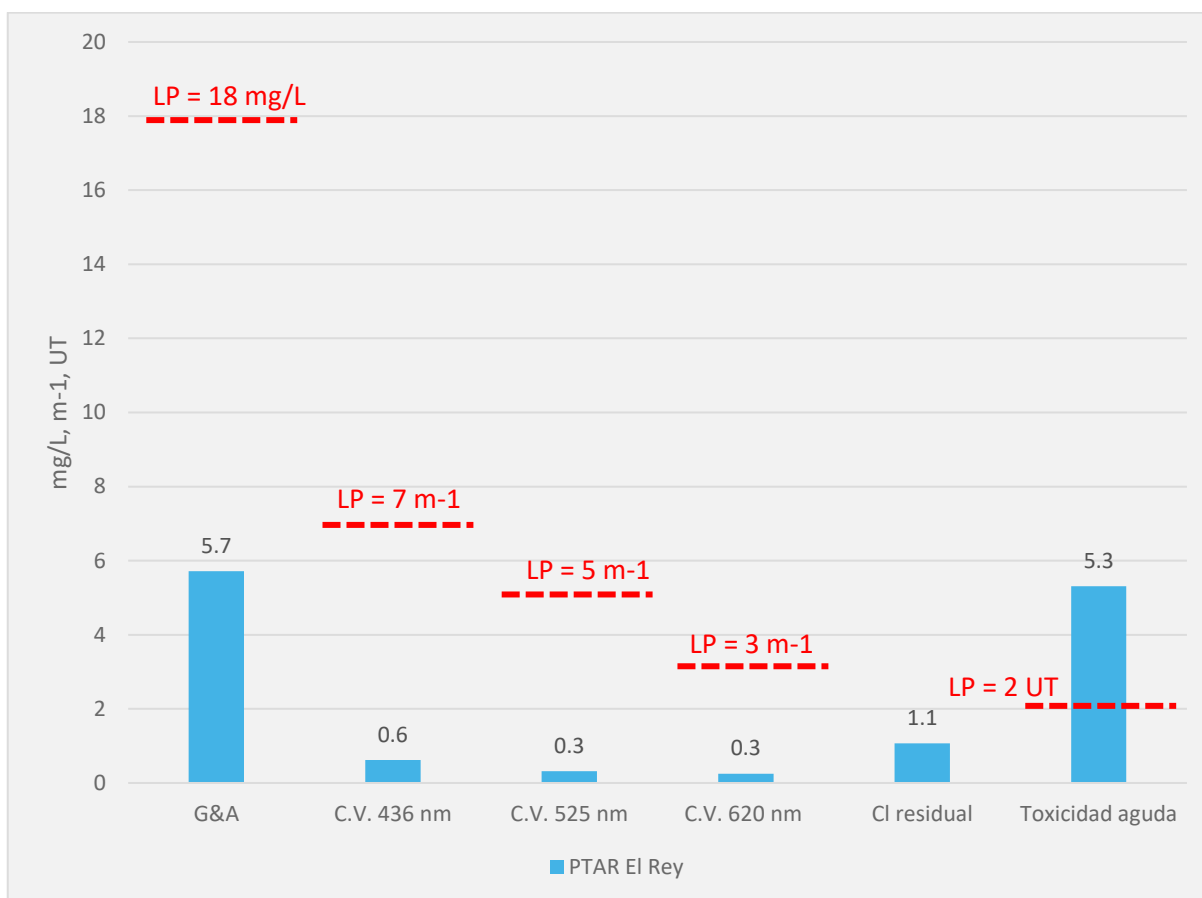
Calidad de agua tratada, de este Estudio

En la siguientes figuras y tabla se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada de la PTAR El Rey, en estas se indican los límites permisibles para el promedio diario en la NOM-001-2022.



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 20 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 21 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)

Tabla 9:
Caracterización del agua tratada de este Estudio (*E.coli* y Huevos de helminto)

Parámetro	Unidades	PTAR El Rey	Límite permisible NOM-001
E.coli	NMP/100 mL	44	100
Huevos de helminto	HH/L	<0.2	1

Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua histórica y del presente estudio

Con la información histórica de calidad de agua tratada proporcionada por FONATUR y los resultados de los análisis efectuados se efectuó el análisis del cumplimiento de los principales parámetros de calidad del agua con respecto a la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021, para los valores de los datos históricos se utilizó el límite permisible del valor promedio mensual y para los resultados de los muestreos efectuados en este estudio se utilizó el límite permisible del valor promedio diario.

Tabla 10:
Cumplimiento del agua tratada

Parámetro	Valor promedio histórico (2020-2021) (mg/L)	Valor Estudio 2022 (mg/L)	Límite permisible NOM-001-2021	Cumple
SST	13	No detectado	PM = 20 (mg/L) PD = 24 (mg/L)	SI
DQO	41	40	PM = 60 (mg/L) PD = 72 (mg/L)	SI
Nitrógeno total	0.9	3.7	PM = 15 (mg/L) PD = 25 (mg/L)	SI
Fósforo total	0.5	0.7	PM = 5 (mg/L) PD = 10 (mg/L)	SI

PM = promedio mensual, PD = promedio diario.

Con respecto a la concentración de *E. coli* y color verdadero en las tres longitudes de onda estuvo dentro del límite permisible. El valor de toxicidad aguda estuvo por encima del límite permisible de 2 UT a los 15 minutos de exposición, esto debido a que la muestra se tomó aguas abajo de la etapa de cloración.

Parámetros de operación del reactor de lodos activados

Como parte de los trabajos de caracterización del agua cruda y tratada de la PTAR, también se incluyó la medición de los sólidos sedimentables (SS). La prueba se realizó con conos Imhoff en un tiempo de reposo de 30 minutos, como se observa en la Figura 22. Los datos obtenidos en campo se presentan en la Tabla 11.



Figura 22 Prueba de Sólidos Sedimentables PTAR El Rey

Tabla 11:
Sólidos sedimentables en reactor de lodos activados PTAR El Rey

Reactor	Sólidos Sedimentables (mL/L)
Reactor 1	610
Reactor 2	790

Los resultados de las pruebas son relativamente altos, se perciben lodos con poca compactación, observándose grandes espacios de agua en el seno de los lodos. Esto puede deberse al control de proceso y diferentes razones operativas, aunque es probable que se haya tenido un alto Índice Volumétrico de Lodos a la hora del muestreo. Esto se relaciona con dificultades en la clarificación.

Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua

Como parte de las actividades realizadas en campo, se registraron las coordenadas de los pozos de infiltración de cada PTAR, utilizando un equipo GPS map 60Cx marca Garmin. En la Tabla 12 se presentan las coordenadas de localización de los pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR El Rey. Posteriormente, en la Figura 23 se presentan fotografías correspondientes al levantamiento de las coordenadas con GPS y de los registros o brocales de los pozos de infiltración.

Tabla 12:
Coordenada de pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR

No. de pozo	Coordenadas Latitud	Coordenadas Longitud
1	21.13865	-86.857015
2	21.138709	-86.857028
3	21.13871	-86.856855



Figura 23 Pozos de infiltración PTAR El Rey

Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR

Pendiente de incorporar, no se ha recibido la información por parte de Aguakan.

Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) de cada planta

De acuerdo a la información proporcionada por FONATUR, el costo total de O & M de la PTAR El Rey en el año 2021 fue de 5.23 millones de pesos (mdp's), desagregado de la siguiente forma:

Costo de operación:	4.18 mdp's
Costo de mantenimiento:	1.06 mdp's

Considerando que el caudal medio de agua tratada en el año 2021 fue de 70 L/s, que representan un volumen anual de 2,207,520 m³, el costo unitario de O & M es de 2.37 \$/m³ de agua tratada.

En relación a la energía eléctrica consumida en el proceso de tratamiento, la información proporcionada indica los siguientes valores anuales:

Consumo anual de energía:	863,112 kWh
Costo anual:	\$2,671,932

A partir de los valores previos se calcularon los siguientes indicadores:

Costo unitario de la energía.	3.10 \$/kWh
Consumo unitario de energía:	0.39 kWh/m ³
Costo energía respecto al costo O & M:	51 %

En la información de costo de O & M, así como la de consumo y costo de energía eléctrica se debe tener en cuenta que la PTAR El Rey incluye, además de los trenes de agua y lodo, las

siguientes instalaciones:

Cárcamo final de bombeo de agua residual,

Bombeo de agua tratada para uso en riego de áreas verdes públicas por FONATUR,

Bombeo del agua tratada que se comercializa con usuarios particulares.

Estimación de los costos de operación y mantenimiento

A efecto de comparar el costo de operación reportado por FONATUR contra un costo de referencia se procedió a estimar los costos anuales de un grupo de insumos relevantes:

- + Energía eléctrica,
- + Cloro para desinfección,
- + Polímero para espesado y/o desaguado de lodo,
- + Acarreo de lodo desaguado, y
- + Análisis de laboratorio de agua tratada y lodo para cumplimiento normativo y control de proceso
- + Personal de O & M

Para lo anterior, con base en un caudal medio de 70 L/s y la información de calidad de agua cruda y tratada proporcionada por FONATUR se efectuó un balance de materia simplificado para establecer la masa de DBO removida, la generación de lodos en el proceso de tratamiento, la remoción de sólidos suspendidos volátiles en el proceso de digestión y la masa de lodo desaguado a disposición.

Una vez definidos en el balance de materia los valores requeridos, se procedió a aplicar los factores de dosificación o consumo de los principales insumos (energía eléctrica, cloro polímero para espesado y/o polímero para desaguado) con base en la masa de lodo generada y las prácticas adecuadas de operación. En el caso de los análisis de laboratorio de agua tratada y lodos, a partir de los requerimientos normativos.

En la **Tabla 13** se presentan las consideraciones aplicadas para establecer el consumo de los insumos arriba indicados, así como el costo unitario asignado:

Tabla 13:
Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Energía eléctrica	Caudal medio de agua tratada y concentración promedio de DBO	2.08 kWh/kgDBO	2.50 \$/kWh
Cloro	Caudal medio de agua tratada	5.0 mg/L	20 \$/kg

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Polímero para espesado	Producción de lodo con base en caudal medio y concentración promedio de DBO y SST	4.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Polímero para desaguado	Fracción volátil del 75 % del lodo producido y remoción del 40 % de SSV en digestor	7.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Acarreo lodo desaguado, base húmeda	Lodo desaguado al 20 % de sólidos Masa de lodo en base seca/0.20	Ton de lodo en base húmeda	150 \$/ton
Análisis laboratorio Agua tratada	NOM-001 población > 50 mil habitantes	2 muestreos/mes	8,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Lodo / biosólidos	NOM-004 hasta 1,500 ton/año (base seca);	1 muestreo/año	10,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Control de proceso	---	1 lote por mes	6,000 \$/mes

El costo del mantenimiento preventivo de la PTAR y los consumibles asociados a esa actividad se estimó aplicando el criterio de destinar un importe anual equivalente al 0.85 % del costo de inversión de la planta con sus actuales características. El costo de la planta se estableció a partir de un costo base de 750 mil pesos por litro – segundo de capacidad media instalada.

Para establecer el costo del personal de operación y mantenimiento se considera una plantilla “tipo” de doce personas, misma que se desagrega en las siguientes plazas: 1 Jefe de planta, 2 Supervisores de operación/mantenimiento, 5 operadores y 4 auxiliares de operación o mantenimiento.

Los sueldos considerados para establecer este rubro de costo están en el rango de 28,000 pesos mensuales para el Jefe de planta y de 12,000 pesos por mes para el auxiliar de operación, los sueldos del resto del personal están comprendidos dentro de este rango.

Los sueldos nominales se afectaron por un factor de 1.50 para incorporar el costo de las diversas prestaciones y seguridad social del personal. De esta forma se determinó un costo total mensual de\$ 306, 000 por concepto de personal.

El factor unitario de consumo de energía eléctrica asignado permite establecer, además de la energía consumida por la planta, otros dos indicadores que en la PTAR El Rey tienen el siguiente valor:

- + Consumo unitario de energía: 0.47 kWh/m³
- + Potencia media de operación: 300 kilowatts

En la **Tabla 14** se presentan los consumos e importes anuales de los rubros de costo establecidos, así como el costo unitario de cada rubro, al dividir su importe anual entre el volumen de agua tratada. Posteriormente, en la Figura 24 se presenta de manera gráfica el costo unitario desagregado por insumo.

Tabla 14:
Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M

Insumo	Consumo anual	Importe anual \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Energía eléctrica	1,046,894	2,617,236	1.19
Cloro	11,038	220,752	0.10
Polímero para espesado	2,291	343,711	0.16
Polímero para desaguado	3,208	481,195	0.22
Acarreo lodo desaguado	2,005	300,747	0.14
Análisis laboratorio		274,000	0.12
Mantenimiento		637,500	0.29
Personal de O & M		3,672,000	1.66
Total		8,547,141	3.87

Energía eléctrica consumo anual expresado en kWh; cloro, polímero para espesado y polímero para desaguado, en kg; acarreo de lodo, en toneladas.

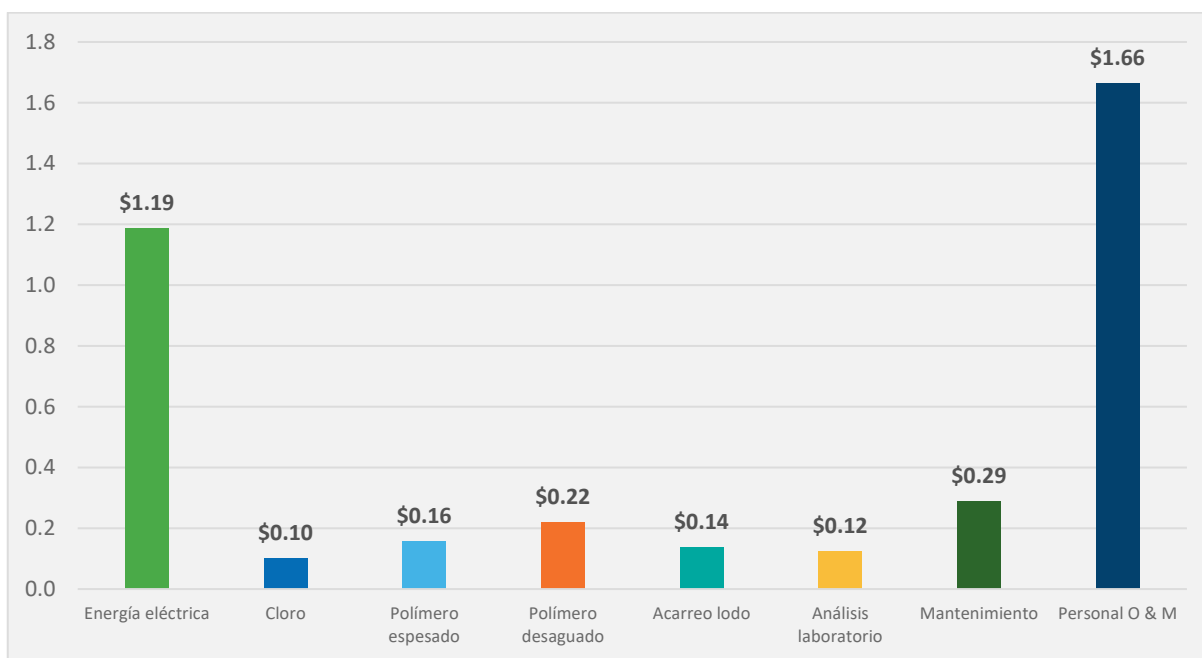


Figura 24 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m³

El importe anual de operación y mantenimiento estimado en esta sección es de 8.55 millones de pesos, con un costo unitario de O & M de 3.87 pesos por metro cúbico de agua tratada.

Al comparar el importe estimado anual de O & M con el importe con importe reportado por FONATUR, de 5.23 millones de pesos, se tiene una excedencia de 3.31 mdp's en el costo estimado con respecto al reportado, que representa un importe adicional de $\approx 39\%$.

No obstante la imprecisión implícita del método para estimar los costos, dados los criterios y premisas generales que se aplican, la diferencia que se obtiene indica que existe moderada insuficiencia en los recursos económicos y medios materiales que se destinan para la operación y mantenimiento de la PTAR El Rey.

Por lo antes expuesto, se considera que el costo de O & M reportado refleja las condiciones de operación y mantenimiento que se observaron tanto en las visitas efectuadas a la planta como en la evaluación de la calidad de agua tratada.

Se hace hincapié en que parte sustancial de la problemática de operación de la planta se debe a la obsolescencia o carencia de equipos electromecánicos de proceso.

Observaciones y recomendaciones generales

A continuación, se presentan las observaciones y recomendaciones que se desprenden de la evaluación de la información proporcionada por la CAPA y del diagnóstico en campo y gabinete de la PTAR El Rey:

1. Se requiere ampliar a corto / mediano plazo la capacidad de tratamiento de agua, considerando que la PTAR El Rey dará servicio a la Tercera Etapa de la Zona Hotelera. La capacidad propuesta es de 150 L/s.
2. En general, es necesario un mantenimiento general de vertedores, canales, tuberías de conducción, soportes, entre otros, para garantizar su funcionamiento adecuado.
3. Actualmente, se requiere de un esfuerzo operativo intensivo para mantener la calidad de agua tratada dentro de los límites permisibles. Algunas de las tareas operativas podrían ser simplificadas con la inclusión de nuevas tecnologías y equipo mecánicos.
4. Se debe equipar adecuadamente el cárcamo de bombeo de agua cruda, con equipos con capacidad para elevar el caudal de diseño de la PTAR y sus ampliaciones. Se recomienda cambiar los equipos por nuevos, debido al deterioro en que se encuentra.
5. Se recomienda reemplazar el pretratamiento manual actual por uno mecánico y mejorar el sistema de desarenación. Los equipos deberán estar diseñados para soportar el caudal pico de la nueva capacidad de la PTAR de 150 L/s.
6. Se recomienda incluir un tanque de regulación del caudal influente a la PTAR, pues mejoraría considerablemente la flexibilidad de operación.
7. El pretratamiento instalado deberá ser de tipo automático pues las basuras y arenas influentes representan una cantidad considerable para manejarse por un operador. Además, se debe considerar incluir el tratamiento de los residuos recolectados como compactadores de cribados, lavadores y clasificadores de arena.
8. Para asegurar el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, es necesario implementar un sistema formal de remoción de nitrógeno. Por su flexibilidad operativa y el espacio existente, se recomienda un esquema de zona preanóxica-aerobia, con recirculación interna.
9. Es necesario cambiar el sistema de aireación superficial existente por uno difuso, para mejorar el gasto y la eficiencia energética de esta operación.
10. Los clarificadores secundario existentes tienen capacidad para recibir más caudal del

de diseño actual de la PTAR (100 L/s) aunque para mejorar la operación se debe asegurar que la distribución de caudal a cada uno sea proporcional a su capacidad.

11. Se requiere implementar un sistema formal de seguridad y dosificación para el gas cloro. Las condiciones actuales no cumplen con diversas normas de seguridad en el trabajo para el manejo de cloro. Además, se debe implementar el equipo necesario para contabilizar el gasto de este reactivo.
12. Según sea el caso, es necesario reemplazar los equipos de bombeo a riego que se encuentren obsoletos u operen con bajas eficiencias energéticas.
13. Tomando en cuenta el reúso intensivo del agua tratada, se recomienda incorporar una etapa de filtración terciaria para asegurar la calidad efluente.
14. Es necesario implementar una etapa de espesado de lodo para mejorar el desempeño de la digestión de lodos y el desaguado.
15. Es necesario ampliar el volumen de digestión aerobia, además de cambiar el tipo de aireación mecánica por un sistema difuso. Esto sobre todo al considerar la ampliación futura de la capacidad de la PTAR.
16. Es necesario reemplazar los equipos de bombeo de lodos (recirculación, lodo digerido, etc.) pues, aunque son funcionales, presentan deterioro medio y algunos han sido complementados con motores diferentes a su diseño.
17. Es necesario rehabilitar la planta de emergencia y conectarla a los equipos más importantes de proceso.
18. Es necesario ampliar la capacidad de desaguado de la planta para operar por menos tiempo y poder recibir una mayor cantidad de sólidos diarios. Operar los equipos por la mayor parte del día, además de tener solo uno, disminuye la flexibilidad de operación de la PTAR y se puede convertir en un cuello de botella. Esto requerirá la ampliación del equipo de preparación de polímero también.
19. El hecho de que el agua ingrese diluida al tratamiento representa una ventaja para facilitar el cumplimiento de la norma en remoción de contaminantes, aunque coloca la mayor parte de las limitantes de proceso en aspectos hidráulicos de las unidades. Los diseños de ampliación deben tomar en cuenta este factor.
20. Dado el espacio adicional con que cuenta la PTAR El Rey para ampliaciones, se recomienda evaluar la viabilidad de enviar los lodos de la PTAR Gucumatz a esta planta, para concentrar las operaciones en una sola instalación.

2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Plantas de tratamiento de agua residual de Fonatur

PTAR El Rey

Las acciones que se proponen para la PTAR El Rey consideran que el caudal medio de diseño se incrementa a 150 L/s, siendo el actual de 100 litros por segundo.



Figura 25 Vista actual de la PTAR El Rey

En la Tabla 15 se presenta el resumen de las acciones propuestas para que la planta pueda cumplir con las especificaciones y límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para las descargas a suelo cárstico.

Tabla 15:
Resumen de las acciones propuestas para la PTAR El Rey

Etapa de Tratamiento	El Rey
TREN DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	Se incorpora
Regulación agua cruda/pretratada	Se incorpora
Sedimentación primaria	No aplica
Filtro biológico	No aplica
Biológico remoción DBO	Existente, mejoramiento
Biológico remoción de fósforo	No aplica
Biológico remoción nitrógeno	Se incorpora
Filtración terciaria	Se incorpora
Desinfección	Cloro gas existente, mejoramiento
TREN DE LODO	
Espesado	Se incorpora
Digestión aerobia	Existente, mejoramiento
Digestión anaerobia	No aplica
Desaguado	Existente, mejoramiento

En la Tabla 16 se presenta la descripción y características de las acciones propuestas de rehabilitación, mejoramiento o incorporación de etapas y/o equipos para la PTAR El Rey.

Tabla 16:
Descripción de las acciones propuestas para la PTAR El Rey

Etapa de tratamiento	El Rey
TREN DE AGUA	
Pretratamiento	1. Incorporar criba de desbaste, con limpieza mecánica 2. Ampliar capacidad de pretratamiento para manejar caudal pico influente a la PTAR. 3. Sustituir bombas de agua cruda, con modulación y capacidad suficiente para el pico horario máximo 4. Incorporar equipos de cribado grueso y cribado fino, de operación y limpieza mecánica • Con claro de 15 y 5 milímetros 5. Incorporar equipos de prensado de sólidos gruesos y finos 6. Incorporar unidad de desarenación y equipo clasificador de arena • Desarenador tipo cámara aereada, con desengrasado
Tratamiento Primario	1. Incorporar unidad de regulación de agua pretratada • Para reducir los sobreflujos y derrames de agua cruda hacia cuerpos receptores. • Se aprovechan para este fin los dos sedimentadores primarios existentes • Con aireación para evitar condiciones sépticas
Tratamiento Secundario	1. Incorporar tanque anóxico para remoción biológica de nitrógeno • Agitadores sumergibles • Bombas de recirculación interna de licor mezclado 2. Aumentar el volumen de la etapa aerobia del reactor 3. Sustituir los aereadores mecánicos por sopladores y difusores de burbuja fina (verificar profundidad del reactor) • Sopladores tipo centrífugo o turbo • Aumentar según sea necesario el suministro de aire para lograr la nitrificación.
Clarificación Secundaria	1. Sustituir rastras, mamparas, vertedores e internos de los clarificadores secundarios 2. Sustituir las bombas de recirculación y añadir purga de lodos activados

Etapa de tratamiento	El Rey
Tratamiento Terciario	1. Incorporar filtración terciaria • Tipo tambor parcialmente sumergido, o de marco fijo, con claro de malla < 20 micras
Desinfección	1. Incorporar sistema de desinfección ultravioleta • Para desinfección del agua tratada a infiltración 2. Habilitar caseta de desinfección con cloro de tipo confinado • Para desinfección del agua para reúso (50 % del caudal) • Como respaldo del sistema UV
TREN DE LODO	
Espesamiento de lodos	1. Incorporar equipo mecánico para espesado de purga de lodo secundario • Tipo mesa espesadora
Digestión de lodos	1. Aumentar volumen de digestor aerobio 2. Sustituir aereadores mecánicos sopladores y difusores (verificar profundidad de digestor) • Sopladores tipo centrífugo o turbo • Difusores de burbuja media o gruesa
Desaguado de lodos	1. Incorporar un nuevo equipo para desaguado de lodos como respaldo del filtro banda existente, requiere rehabilitación línea da agua y eléctricos, tubing • Filtro banda 1. Sustituir sistema de preparación de polímero para espesado y desaguado • Común para espesado y desaguado de lodos
Secado adicional de lodo desaguado	1. No aplica
TEMAS VARIOS	1. Evaluar posibilidad de enviar por bombeo los lodos de la PTAR Gukumatz a la PTAR El Rey, para concentrar en ésta las operaciones de manejo, estabilización y desaguado • Ya existe bombeo y línea entre la PTAR Gukumatz y El Rey

En la Figura 26 se presenta el diagrama de flujo del tren de tratamiento de agua y de lodos de la PTAR El Rey incorporando las acciones propuestas para que la planta produzca agua tratada que cumpla con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas a suelo cárstico.

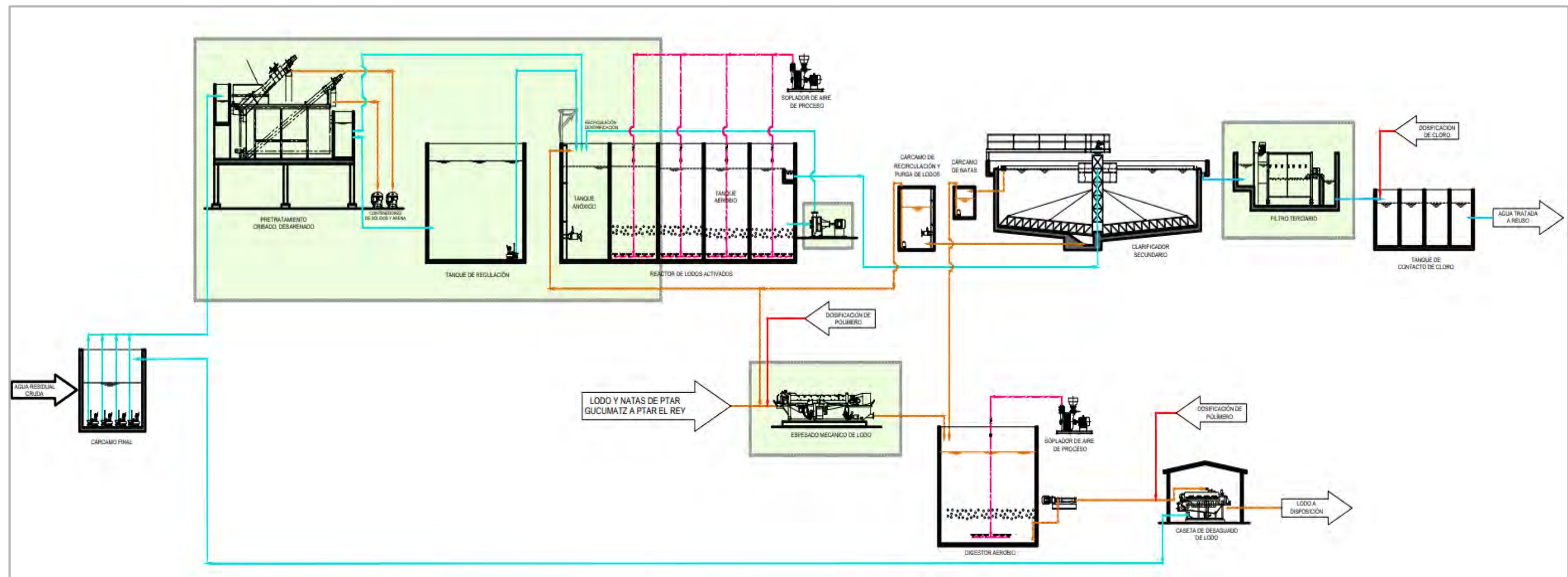


Figura 26 Diagrama de flujo de la PTAR El Rey con las acciones propuestas



3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el procedimiento realizado para la estimación de costos de las acciones necesarias por ejecutar para que la PTAR El Rey cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; en dicho presupuesto se incluye el costo de obra civil, electromecánica, eléctrica, instrumentación y control para obra nueva o ampliaciones, rehabilitación de obras existentes y proyecto ejecutivo y supervisión de obra y proyecto ejecutivo.

Las acciones de mejora surgen de la visita y diagnóstico técnico que se presenta previamente, así como de las entrevistas e información recabada con las áreas responsables de la operación y gestión de los recursos para saneamiento.

Techo financiero

El techo financiero para la implementación de las acciones de mejora y rehabilitación de la PTAR, se realizó a partir de costos paramétricos, como lo indican los Términos de Referencia.

Para lo anterior se recurrió a costos base de unidades de proceso y equipamiento similares y de capacidad comparable con las necesidades de las PTAR que forman parte de este estudio, de igual manera dichos costos son ajustados de acuerdo a la capacidad necesaria.

En la Tabla 17 se muestran los costos base por unidad de proceso, los cuales corresponden al costo de mercado establecido en proyectos realizados en el año 2021 y 2022 en Quintana Roo, en plantas de tratamiento con proceso de remoción biológica de nitrógeno y fósforo, así como equipamiento electromecánico y de proceso, tanto de tipo convencional como relativamente nuevo en la región, como es la filtración terciaria y la desinfección con lámparas ultravioleta.

Tabla 17:

Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio

Unidad de proceso	Costo base en MDP
TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	20.97
Regulación agua cruda/pretratada	12.65
Sedimentación primaria	13.12
Caja distribuidora agua primaria	0.99
Filtro biológico	
Biológico remoción DBO	22.99
Biológico remoción de fósforo	2.50
Biológico remoción nitrógeno	5.75
Clarificación secundaria	14.80
Recirculación y purga de lodo	6.89
Filtración terciaria	12.12
Desinfección	10.49
Pozo de infiltración	1.60
TREN DE TRATAMIENTO DE LODOS	
Espesado de lodo	7.79
Digestión aerobia	16.09
Digestión anaerobia	59.55
Tanque de lodo digerido	3.77
Desaguado de lodo	17.43
Cogeneración	18.81

Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con las acciones a realizar en la PTAR se estimaron los costos de inversión, esto de acuerdo con los costos base y el factor de ajuste, los cuales están relacionado con el caudal de tratamiento.

A continuación se describe el procedimiento aplicado a cada planta de tratamiento (identificada como PTAR "n") para establecer el techo financiero preliminar de los recursos económicos requeridos para implementar el plan de acciones:

1. Los costos de referencia de las unidades de proceso se ajustaron a valores de noviembre de 2022 con el factor de actualización que resulta de dividir el INPC de noviembre entre el INPC del mes en que se originó el presupuesto.

A manera de ejemplo, a continuación se describe el procedimiento:

- Fecha del presupuesto de la unidad de proceso o PTAR de referencia: octubre de 2021.
- Valor del INPC en octubre de 2021: 115.561
- Valor del INPC de noviembre de 2022: 125.997
- Factor de actualización costo de referencia: $125.997/115.561 = 1.090$

2. El costo de referencia del proceso de digestión anaerobia y del sistema de cogeneración se determina con base en un digestor anaerobio con sistemas periféricos; tamizado de lodo, tratamiento lateral de la corriente de desaguado de lodo anaerobio; antorcha de quemado de biogás, gasómetro para almacenar el biogás generado, acondicionamiento de biogás; caseta de equipos de digestión y sistema de cogeneración.

En la siguiente tabla se presenta el desglose y capacidad de los componentes de las etapas de digestión anaerobia de lodos y del sistema de cogeneración:

Etapa de Digestión Anaerobia de Lodo

Concepto	Importe actualizado, mdp
Tamizado de lodo (capacidad para 5 L/s de lodo espesado al 5%)	1.22
Digestor anaerobio mesofílico (de 5 700 m ³)	43.25
Gasómetro de membrana y periféricos (de 1.000 m ³)	6.14
Quemador de biogás y periféricos (capacidad para 225 m ³ /h)	1.59

Concepto	Importe actualizado, mdp
Edificios operativos	2.71
Tratamiento lateral del agua retirada en desaguado de lodo	4.64
Subtotal	59.55
Obra eléctrica (12 % del subtotal)	7.44
Control (3 % del subtotal + obra eléctrica)	2.01
Contingencias (8 % del subtotal + obra eléctrica + control)	5.52
Total	74.53

Sistema de Cogeneración

Concepto	Importe actualizado, mdp
Sistema de tratamiento de biogás (capacidad para 225 m ³ /h) para remoción de humedad, impurezas y H ₂ S	7.10
Sistema integral de cogeneración (capacidad de 500 kW eléctricos)	11.72
Total	18.81

El costo actualizado de las unidades de proceso se ajustó posteriormente en función de la capacidad (a caudal medio) de las unidades de proceso de la PTAR "n", en relación con la capacidad de la PTAR de referencia, acorde a lo siguiente:

$$\text{Costo PTAR "n"} = \text{Costo PTAR de referencia} * ((\text{Tamaño PTAR "n"} / \text{Tamaño PTAR referencia})^{0.70})$$

La capacidad de la PTAR de referencia es para un caudal promedio de 150 L/s.

A manera de ejemplo, al utilizar la ecuación anterior, y considerando que la PTAR "n" es de 350 L/s de capacidad, se obtiene un multiplicador de 1.81, mismo que se aplica sobre el importe de las unidades de proceso de la PTAR de referencia.

De esta forma, en lugar de ajustar el costo de la PTAR "n" con una relación lineal entre el tamaño de ambas plantas (2.33), el criterio toma en cuenta que el costo unitario de inversión (\$ por L/s de capacidad) disminuye al aumentar el tamaño de la unidad de proceso y/o de la PTAR.

Este procedimiento de ajuste de costo se utilizó en las unidades de proceso cuyo dimensionamiento está determinado por la capacidad y carga hidráulica, como es el caso de las etapas que a continuación se indican:

- Pretratamiento (cribado y desarenación)
- Regulación y/o bombeo de agua cruda/pretratada
- Sedimentación primaria
- Caja distribuidora agua primaria
- Clarificación secundaria
- Recirculación y purga de lodo
- Filtración terciaria
- Desinfección
- Tanque de lodo digerido

Asimismo, el procedimiento de ajuste de costo descrito en este numeral también es aplicable en los procesos biológicos de tratamiento de agua y en las operaciones y procesos del tren de tratamiento de lodos, cuando en la PTAR "n" se presenta la condición de carga influente orgánica y de sólidos que se describe en el siguiente numeral.

3. El factor de ponderación arriba referido se utiliza de manera directa si la carga contaminante influente a la PTAR "n", expresada como la concentración promedio de la DBO y SST en el agua residual cruda, es comparable a la de ($\leq 20\%$) la PTAR de referencia.

La concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente a la PTAR de referencia es 350 mg/L.

Se considera que el agua residual influente a la PTAR "n" es comparable al agua residual de la PTAR de referencia, cuando la concentración promedio de DBO y SST está en el rango de $\pm 20\%$ a la concentración indicada en el párrafo previo.

4. A continuación se enlistan las operaciones y procesos del tren de tratamiento de agua y de lodos que, en caso de variación mayor al 20 % en la concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente, estarían sujetos a ajuste de costo adicional al ya aplicado en el numeral 3.
 - Filtro rociador
 - Reactor de lodos activados, remoción DBO
 - Reactor de lodos activados, remoción de fosforo
 - Reactor de lodos activados, remoción nitrógeno
 - Espesado de lodo
 - Digestión aerobia
 - Digestión anaerobia
 - Desaguado de lodo

En los casos en que la calidad del agua residual influente a la PTAR "n" tiene una variación superior al 20%, hacia arriba o hacia abajo, se procedió a aplicar un ajuste adicional al costo de inversión en las operaciones y procesos del listado inmediato previo.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual influente es $\approx 30\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.05 o 0.90, según corresponda.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual es $\approx 40\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.12 o 0.80, según corresponda.

5. Se aplicó un factor de ponderación para los casos en que la actividad propuesta no es una unidad de proceso nueva y completa, es decir que consiste en la rehabilitación, mejoramiento o complemento de capacidad de una etapa de proceso o unidad existente.

El valor del factor de ponderación asignado en estos casos está en el rango de 0.35 a 0.65, a criterio del especialista, en función del grado de intervención que se requiere para la unidad de proceso en cuestión.

En términos generales, los valores cercanos al límite inferior del rango se aplicaron cuando la acción implicaba rehabilitación civil única o principalmente; los valores cercanos al límite superior se aplicaron cuando la intervención implica también reequipamiento electromecánico.

6. Una vez establecido el importe de inversión por planta de las principales unidades del tren de tratamiento de agua y de lodos, para determinar el importe de otros componentes de la PTAR a dicho importe se aplicó un valor seleccionado de los rangos de porcentaje que a continuación se indican:

Equipo menor:	5 % a 8 %
Vialidades, patios y obras exteriores:	1 % a 5 %
Obra eléctrica:	10 % a 15 %
Automatización y control:	3 % a 5 %
Imprevistos y contingencias:	8 % a 12 %

7. El importe por elaboración del proyecto ejecutivo de las acciones propuestas por planta se determinó a partir de un porcentaje, en el rango del 1.2 % al 3.5 %, mismo que se aplicó sobre el importe total estimado.

8. El costo de la supervisión de la ejecución y puesta en marcha de las obras y equipamiento propuestas en el Plan de Acciones por planta, se estableció aplicando un porcentaje del 3.5 % sobre el importe total estimado, sin incluir los importes correspondientes al costo del proyecto ejecutivo y de capacitación.

Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares

La selección de la digestión anaerobia como proceso de tratamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, orientado a la generación de biogás para su aprovechamiento, o bien la opción de instalar paneles solares en estas plantas, ha sido justificada mediante criterios técnicos específicos. Estos criterios incluyen la capacidad operativa de las plantas, la disponibilidad de espacio físico y las propiedades de la carga orgánica influente. En particular, en el caso de las PTAR ubicadas en el Estado de Quintana Roo, el contexto local en que se encuentra cada planta cobra especial relevancia, dado que las condiciones geográficas, ambientales y de infraestructura turística pueden influir en la viabilidad y eficiencia de cada tecnología implementada.

Este análisis permite una decisión fundamentada, buscando optimizar tanto el rendimiento energético como el aprovechamiento sostenible de los recursos locales.

Antecedentes

Como parte del diagnóstico para el mejoramiento de las PTAR de Quintana Roo mayores a 100 L/s, la digestión anaerobia se considera en las siguientes PTAR:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur que recibe también los lodos de la PTAR Caribe
4. PTAR Saas Tun Ha (a futuro, mediano plazo)

Adicionalmente, la instalación de paneles solares se considera en las siguientes PTAR, de las cuales las primeras tres son instalaciones existentes:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur
4. PTAR El Rey
5. PTAR Saas Tun Ha
6. PTAR San Miguelito
7. PTAR Bicentenario
8. PTAR Centenario

Digestión Anaerobia y Cogeneración

La digestión anaerobia es un proceso biológico mediante el cual los lodos residuales se descomponen en ausencia de oxígeno, generando biogás. El biogás, compuesto principalmente de metano, puede ser aprovechado para producir electricidad y calor mediante sistemas de cogeneración. Además de reducir el volumen de lodos, la digestión anaerobia permite un manejo más eficiente de los residuos, mejorando la sostenibilidad de las plantas al aprovechar el potencial energético del metano.

Los principales aspectos considerados para proponer digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás en las PTAR se presentan en seguida. Todos fueron considerados en conjunto para cada planta.

Condiciones climáticas

La temperatura está relacionada con la velocidad de las reacciones químicas. En el diseño de la digestión anaerobia, la temperatura aumenta la velocidad de hidrólisis y de formación de metano, además disminuye el mínimo tiempo de retención requerido para llegar a una destrucción de sólidos aceptable (38 % en SSV).

Para un proceso mesofílico, que es el seleccionado para las PTAR de Quintana Roo, las temperaturas óptimas se encuentran entre los 30 y 38°C (Metcalf & Eddy, 2014), lo cual es fácilmente alcanzado en la región, con temperaturas de agua residual alrededor de los 30°C todo el año. El no requerir un sistema para control fino de la temperatura es una gran ventaja de toda la zona.

Carga orgánica influente

Se requiere mantener cierta carga orgánica para mantener el equilibrio entre los microorganismos que realizan la digestión anaerobia y mantener una producción de biogás constante. La carga orgánica alimentada al digestor proviene de la fracción de SSV en los lodos generados en el proceso primario y/o secundario y éstos a su vez dependen de las características del agua residual.

En general, la carga orgánica influente necesaria proviene de un análisis detallado del proceso para cada caso, sin embargo, existen lineamientos con reglas generales para anticipar este resultado. En el caso de las PTAR de Quintana Roo, se consideraron para digestión anaerobia las PTAR que en su operación actual o a capacidad plena, recibieran más de 300 L/s o carga orgánica igual o mayor a 7.5 ton DBO/d, esto de acuerdo con estudios técnicos realizados previamente por GIZ (GIZ México, 2017).

Toxicidad

La digestión anaerobia es un proceso sensible a variaciones de pH y puede verse afectada por la presencia de ciertas sustancias inhibitoras en las aguas residuales. Para la instalación de

una nueva PTAR, es fundamental realizar análisis previos para descartar la presencia de estos compuestos que puedan interferir en el proceso. En el presente caso, dado que las PTAR evaluadas ya están en operación, se ha verificado que en los sitios propuestos para la digestión anaerobia no se han registrado historiales de inhibiciones significativas al proceso biológico, lo que garantiza su viabilidad.

Volumen y tipo de lodos generados

Una de las principales ventajas de la digestión anaerobia es la generación de biogás, siendo más eficiente esta generación cuanto mayor es la carga orgánica en los sólidos alimentados. En los sitios propuestos, además de lodos secundarios, se procesan lodos primarios con alto contenido de SSV, lo que incrementa la generación de biogás. Las altas cargas orgánicas influentes a las plantas aseguran buena generación de sólidos, maximizando la eficiencia del sistema de digestión.

Disponibilidad de espacio

Los sitios con propuesta de digestión anaerobia fueron revisados para la disponibilidad de espacio para una unidad de digestión anaerobia junto con gasómetro e instalaciones de cogeneración y manejo de biogás.

Disponibilidad operativa

La digestión anaerobia es una unidad significativamente más compleja que las demás en el tren de tratamiento, lo que demanda mayor capacidad técnica y un personal operativo especializado para su correcta operación a lo largo de la vida útil de la PTAR. En las plantas propuestas, se considera que cuentan con el personal y la capacidad técnica necesarios para implementar y mantener este proceso de manera eficiente.

Viabilidad operativa

Con base en la calidad de agua, la temperatura, el caudal influente y el tipo de proceso, es posible estimar la cantidad de lodos producidos en cada PTAR. Los lodos producidos son la base para estimar el tamaño ideal del digestor anaerobio. De acuerdo con la literatura (Metcalf & Eddy, 2014) el tiempo de retención recomendado para los lodos a 30°C es de 6 a 14 días y la carga orgánica puede variar entre los 1.6 y 4.8 kg SSV/m³ d.

A manera de ejemplo, con el volumen de 5,700 m³/d y a una carga de 2.4 kg SSV/ m³ d sería posible alimentar hasta 13.7 toneladas al día de lodo. Este flujo másico a una concentración de 3.5 % en sólidos tendría un tiempo de residencia de 14.6 días. La producción de lodo actual de las PTAR seleccionadas para digestión anaerobia varía entre 6.7 y 9.9 toneladas al día, y puede ser aún mayor de acuerdo con la capacidad de tratamiento de agua residual instalada. El volumen seleccionado considera este crecimiento además de las necesidades actuales.

Conclusiones para biogás y cogeneración

Los aspectos anteriores se analizaron y forman parte del análisis de costo presentado. En general en las PTAR seleccionadas es positiva la presencia de la digestión anaerobia. En resumen, para seleccionar las PTAR donde es viable instalar digestión anaerobia se consideró que:

1. La temperatura de la zona es favorable con 30°C.
2. La carga orgánica influente a las PTAR y/o el caudal se encuentran en el umbral de 7.5 ton/d de DBO o 300 L/s de caudal tratado.
3. Los procesos biológicos existentes no presentan obstáculos por sustancias inhibitoras.
4. La presencia de lodo primario favorece la producción de biogás.
5. Existe suficiente espacio para la instalación de las unidades respectivas.
6. Existe suficiente personal operativo y capacidad técnica para mantener la unidad funcionando eficientemente.
7. El volumen seleccionado como base para los costos cubre los rangos de operación actuales y futuros de cada PTAR.
8. En el balance económico, la producción y aprovechamiento del biogás es un instrumento importante para hacer viable la operación de las PTAR más grandes.

Generación de Energía Solar

A diferencia de la digestión anaerobia, la instalación de paneles solares es un proceso más sencillo y viable para prácticamente cualquier PTAR. El criterio principal para su implementación fue la disponibilidad de espacio en la planta y su tamaño, siendo seleccionadas aquellas de mediana o gran escala.

Las plantas que no tienen suficiente carga orgánica para justificar la digestión anaerobia, pero disponen de amplias áreas, pueden aprovechar los paneles solares para reducir su dependencia de la red eléctrica y generar energía renovable de manera sostenible. En consecuencia, esta tecnología se considera para casi todas las PTAR.

El costo de implementación de ambas tecnologías no es equivalente, siendo la digestión anaerobia considerablemente más costosa. Sin embargo, como se muestra en el análisis económico, la generación de biogás a escalas superiores al umbral establecido por la GIZ produce una cantidad significativa de energía eléctrica, generando importantes ahorros a largo plazo. Además, la digestión anaerobia requiere una mayor capacidad técnica para su operación. En contraste, los paneles solares, más sencillos de instalar y mantener, representan una opción accesible y conveniente para todas las PTAR.

A continuación se presenta una tabla resumen con los principales criterios utilizados para la selección de digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás, así como para la instalación de paneles solares.

			Principales Criterios para selección de Digestión Anaerobia					Criterio de selección para la instalación de Paneles Solares	
Nombre de la planta	Capacidad instalada (L/s)	DBO entrada (mg/L)	Carga orgánica influente (Ton DBO /día)	Carga orgánica > 7.5 ton / día	Sedimentación primaria (Lodo primario)	Disponibilidad operativa	Digestión Anaerobia	Espacio disponible	Paneles solares
El Rey	100	144	1.2	NO	NO	SI	NO	SI	SI

Resumen de inversión, techo financiero

En la Tabla 18 se muestra el monto de inversión por unidad de proceso o componente de proyecto, y en la Figura 27 se muestra su distribución porcentual.

Tabla 18:
Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Etapa o componente	Importe PTAR El Rey, mdp's
Proyecto ejecutivo	2.00
Bombeo / regulación / pretratamiento / primario	25.39
Remoción DBO y nutrientes, desinfección	26.51
Tratamiento terciario	12.12
Tren de tratamiento de lodos	45.08
Digestión anaerobia	
Cogeneración	
Paneles solares	11.34
Equipo menor	6.02
Terracerías, vialidades, patios	3.61
Obra eléctrica	14.45
Automatización y control	3.61
Imprevistos y contingencias	9.63
Supervisión	5.54

Etapa o componente	Importe PTAR El Rey, mdp's
Capacitación	0.40
Total	165.71

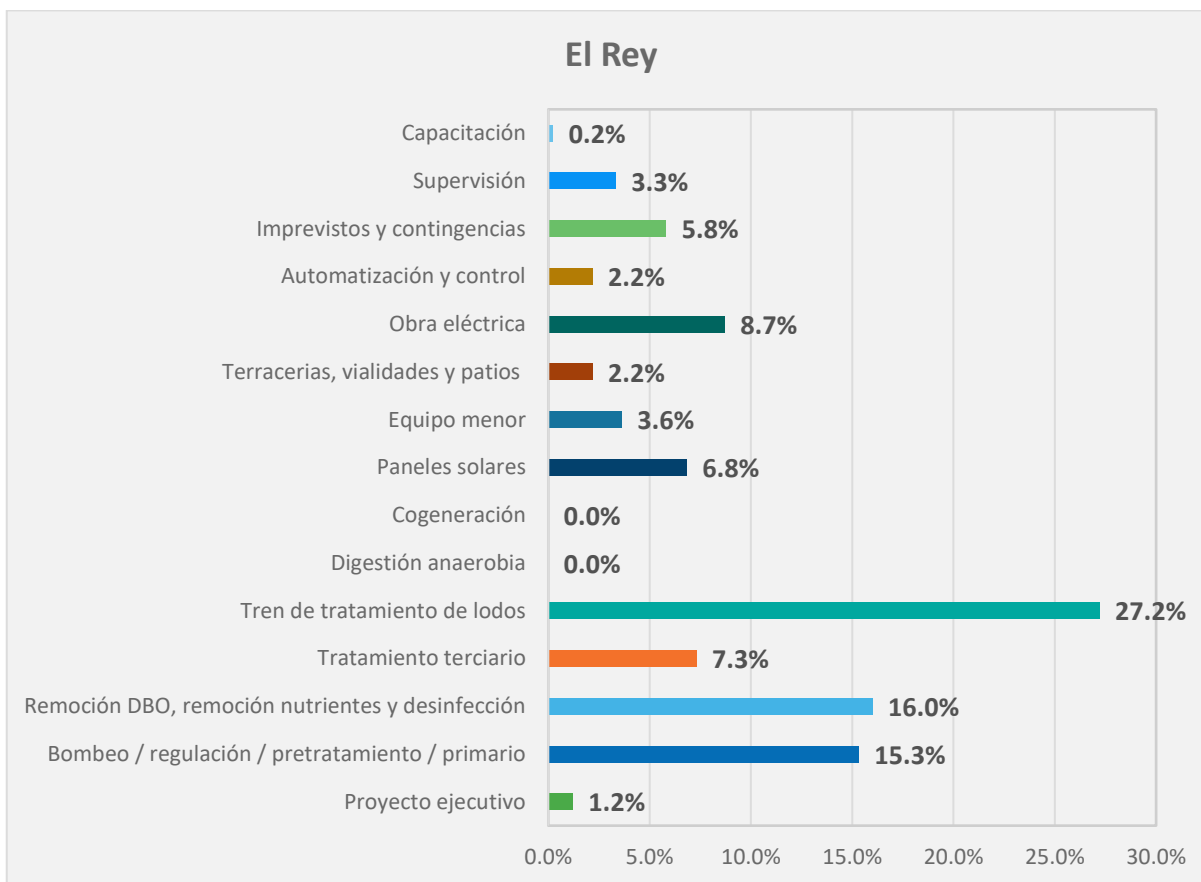


Figura 27 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

En la Tabla 19 se muestra el resumen del techo financiero total.

Tabla 19:
Monto de inversión, millones de pesos

PTAR	Capacidad instalada, L/s	Capacidad propuesta, L/s	Inversión requerida	Inversión Digestión Anaerobia	Inversión Cogeneración	Inversión Paneles solares	Inversión Total	Inversión unitaria, k\$/lps
El Rey	100	150	154.4			11.3	165.7	1,105

A continuación, se muestra la estimación detallada de costos, se describe la unidad de proceso, el factor de ajuste integrado y monto de inversión estimado, así como los porcentajes aplicados a las obras complementarias: vialidades, obra eléctrica, de control e instrumentación, imprevistos, proyecto ejecutivo, supervisión y capacitación.

Tabla 20:
Estimación detallada de costos PTAR El Rey

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tren de Tratamiento de Agua		
Pretratamiento mecánico	1.00	20.97
Regulación agua cruda/pretratada	0.35	4.43
Sedimentación primaria		
Caja distribuidora agua primaria		
Filtro biológico		
Biológico remoción DBO	0.35	8.05
Biológica remoción de fósforo		
Biológico remoción nitrógeno	0.50	2.87
Clarificación secundaria	0.35	5.18
Recirculación y purga de lodo	0.75	5.17
Filtración terciaria	1.00	12.12
Desinfección	0.50	5.24
Pozos de infiltración		
Tren de Tratamiento de Lodos		
Espesado	1.00	7.79
Digestión aerobia	1.00	16.09
Digestión anaerobia		
Tanque de lodo digerido	1.00	3.77

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Desagüado	1.00	17.43
Cogeneración		11.34
Subtotal		120.44
Equipo menor	5.0%	6.02
Terracerías, vialidades y patios	3.0%	3.61
Obra eléctrica	12.0%	14.45
Automatización y control	3.0%	3.61
Imprevistos y contingencias	8.0%	9.63
Proyecto ejecutivo		2.00
Supervisión		5.54
Capacitación		0.40
Total		165.71

A decorative graphic consisting of three wavy, horizontal lines in blue, green, and grey, located on the left side of the page above the section header.

4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el programa de inversiones necesarias por ejecutar para que la PTAR cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; este programa abarca del año 2023 al año 2027.

Este programa de inversiones es el resultado de las acciones propuestas para mejorar la calidad del agua tratada de las PTAR's con capacidad de tratamiento igual o mayor a 100 l/s en el estado de Quintana Roo, así como el presupuesto derivado del plan de acciones. La programación de las inversiones se basa en las necesidades propias de cada planta considerando el objetivo principal, que es el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

El 5 de diciembre de 2022 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación los:

LINEAMIENTOS que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Los Lineamientos constan en total de veintitrés artículos, más un artículo transitorio, así como el denominado Anexo A: Instructivo para la Información Requerida en el Sistema.

Los Lineamientos están estructurados en seis capítulos:

- + Capítulo Primero, Disposiciones Generales
- + Capítulo Segundo, Requisitos para la Presentación y Registro de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Tercero, De los Plazos de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Cuarto, Procedimiento para la presentación, registro y revisión de los Programas para el Cumplimiento, así como del Informe de Avances
- + Capítulo Quinto, De las Verificaciones
- + Capítulo Sexto, De las Sanciones

Aspectos Clave de los Lineamientos

Artículo 2. Sujeto Regulado: El responsable de descargas de aguas residuales al que resulte aplicable la NOM-001-SEMARNAT-2021, quien podrá presentar sus Programas para el Cumplimiento ante la Comisión.

Artículo 5. La presentación del Programa para el Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, **es de naturaleza voluntaria**, por lo que, en caso de su incumplimiento, el responsable de la descarga de aguas residuales en cualquier cuerpo receptor propiedad de la nación, quedará sujeto a los plazos establecidos en la mencionada Norma Oficial Mexicana

Artículo 6. El Sujeto Regulado presentará su Programa para el Cumplimiento, en los siguientes supuestos:

- a) Cuando **deba modificar sus instalaciones** con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como el Apéndice Normativo de la NOM-001-SEMARNAT-2021, y que los ajustes y acciones que se deban ejecutar de acuerdo a los estudios realizados por dicho Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor, en el Artículo 2o Transitorio de la NOM, o bien,
- b) Que el Sujeto Regulado **deba modificar los procesos productivos de las actividades que generan la descarga de aguas residuales**, con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como al Apéndice Normativo y que dichas modificaciones, de acuerdo con los análisis o la evidencia del Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor.

Artículo 7. El Sujeto Regulado, en caso de presentar el Programa para el Cumplimiento lo hará por cada uno de los puntos autorizados en su Permiso de Descarga, y que, para cumplir con las disposiciones establecidas en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se ubiquen en alguno de los supuestos establecidos en el Artículo 6 de los Lineamientos.

Artículo 8. Una vez registrado el Programa para el Cumplimiento, y en tanto este se encuentre vigente, en concordancia con el Artículo 5º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, el Sujeto Regulado deberá cumplir, además de lo comprometido en el Programa, con los límites y parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, para gozar de los beneficios e incentivos que para tales efectos establezca la LFD vigente.

Artículo 10. El Programa para el Cumplimiento, contendrá:

- + Nombre, denominación o razón social del Sujeto Regulado;
- + RFC del Sujeto Regulado;
- + Datos de identificación del Permiso de Descarga; Volumen de descarga; Datos del medidor o dispositivo de medición de las aguas residuales descargadas; Coordenadas del punto de descarga;
- + Datos generales del representante legal; Correo electrónico;
- + Justificación de la solicitud para la aplicación del Programa para el Cumplimiento;
- + Cronograma de actividades para las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento; Periodo solicitado;
- + E-Firma del Sujeto Regulado o representante legal.

Artículo 12. Los Programas para el Cumplimiento deberán presentarse ante la CONAGUA, por el Sujeto Regulado **a partir de que entre en vigor la NOM-001-SEMARNAT-2021 y hasta el 3 de abril del 2023.**

El Sujeto Regulado que no presente su Programa para el Cumplimiento en el periodo señalado, se sujetará a los plazos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 13. Los plazos que se establezcan en el Cronograma de Actividades para el seguimiento de las acciones comprometidas en los Programas para el Cumplimiento **no deberán rebasar el 11 de marzo de 2027.**

Artículo 15. La CONAGUA realizará revisiones aleatorias a los Programas para el Cumplimiento, podrá solicitar al Sujeto Regulado, las aclaraciones o información adicional que considere necesarias. En el supuesto de que el Sujeto Regulado no atienda el requerimiento de información dentro de los veinte días hábiles siguientes, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y será aplicable lo establecido en el Artículo 2º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 16. Una vez registrado el Programa ante la CONAGUA, no será objeto de modificación, salvo en el caso que el Sujeto Regulado justifique la necesidad de realizar algún cambio y no exceda el plazo originalmente establecido.

Artículo 17. El Sujeto Regulado debe presentar **dentro de los primeros cinco días hábiles de los meses de marzo y septiembre de cada año**, a partir de la fecha del registro, el avance de actividades mediante la carga de información que solicite el Sistema de Gestión en el apartado correspondiente al Informe de Avance del Programa para el Cumplimiento. Cuando el Sujeto Regulado no envíe en tiempo y forma la información del Informe de Avance, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y se aplicarán las disposiciones de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 21. La CONAGUA procederá a cancelar el Programa para el Cumplimiento y su registro, cuando compruebe que el Sujeto Regulado no ha cumplido con lo comprometido en el programa registrado. La CONAGUA, procederá a notificar la cancelación del Programa, por lo que quedarán sin efectos las acciones de cumplimiento propuestas por el Sujeto Regulado en su respectivo Programa, aplicándose las disposiciones correspondientes de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 22. Cuando las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento presentado impliquen la suspensión de sus procesos productivos y actividades para llevar a cabo las acciones tendientes a la conversión de procesos productivos o la instalación de maquinaria, equipos o plantas que se requieran para el cumplimiento de los parámetros y límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, y deba quedar fuera de operación el sistema de tratamiento de aguas residuales, el Sujeto Regulado deberá dar aviso a la CONAGUA, al menos 30 días hábiles antes de que esto ocurra, e indicar el periodo por el que prevalecerá dicha situación, el cual **no deberá exceder de tres meses**, y podrá presentarse **hasta un máximo de dos ocasiones** durante la vigencia del Programa.

De llevar a cabo la suspensión de sus procesos de tratamiento de aguas residuales sin el aviso correspondiente se aplicarán las sanciones previstas. Una vez recibida la solicitud, el Sistema de Gestión emitirá el comprobante que acreditará que la solicitud fue hecha en tiempo y forma.

Artículo 23. En caso de incumplimiento a los compromisos establecidos en el Programa para el Cumplimiento, quedan sin efecto las prerrogativas que ampara dicho documento, por lo cual el Sujeto Regulado será acreedor a las sanciones que correspondan y, en su caso, estará obligado a efectuar el pago de los derechos por el uso y aprovechamiento de cuerpos receptores de descargas de aguas residuales propiedad de la nación, a partir de la fecha del incumplimiento, así como de aquéllos que se hubieren generado con anterioridad, con sus accesorios, conforme a la LFD vigente.

Programa de inversión anual

Como se mencionó anteriormente, el monto de inversión total del Plan de Acciones es de 165.71 millones de pesos (mdp), inversión a realizarse en 5 años a partir del año 2023 hasta marzo del 2027, acorde al plazo previsto en los Lineamiento que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el presente apartado se muestra el desglose anual del Plan de Acciones, donde se describe el monto de inversión por año y unidad de proceso y/o componente del proyecto programado, así como los importes anuales y acumulados y su porcentaje de participación en la inversión.

Tabla 21:
Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
A	Proyecto ejecutivo	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00
		100.0 %	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
B	Cárcamo, regulación, pretratamiento, y/o tratamiento primario	0.00	12.70	12.70	0.00	0.00	25.39
		0.0%	50.0%	50.0%	0.0%	0.0%	100.0%
C	Tren de tratamiento de agua	26.51	0.00	0.00	0.00	0.00	26.51
		100.0 %	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
D	Tratamiento terciario	0.00	0.00	0.00	12.12	0.00	12.12
		0.0%	0.0%	0.0%	100.0 %	0.0%	100.0%
E	Tren de tratamiento de lodos	0.00	22.54	22.54	0.00	0.00	45.08
		0.0%	50.0%	50.0%	0.0%	0.0%	100.0%

Clav e	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
F	Cogeneración (y/o paneles solares)	0.00	0.00	0.00	9.07	2.27	11.34
		0.0%	0.0%	0.0%	80.0%	20.0%	100.0%
G	Equipo menor	1.40	1.73	1.73	1.04	0.11	6.02
		23.3%	28.8%	28.8%	17.3%	1.9%	100.0%
H	Terracerías, vialidades y patios	0.84	1.04	1.04	0.63	0.07	3.61
		23.3%	28.8%	28.8%	17.3%	1.9%	100.0%
I	Obra eléctrica	3.36	4.16	4.16	2.50	0.27	14.45
		23.3%	28.8%	28.8%	17.3%	1.9%	100.0%
J	Automatización	0.84	1.04	1.04	0.63	0.07	3.61
		23.3%	28.8%	28.8%	17.3%	1.9%	100.0%
K	Imprevistos y contingencias	2.24	2.77	2.77	1.67	0.18	9.63
		23.3%	28.8%	28.8%	17.3%	1.9%	100.0%
L	Supervisión	1.29	1.59	1.59	0.96	0.10	5.54
		23.3%	28.8%	28.8%	17.3%	1.9%	100.0%
M	Capacitación	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.40
		0.0%	50.0%	50.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	Total Anual y Gran total, mdp's	38.49	47.77	47.77	28.61	3.06	165.71
	Acumulado anual, mdp's	38.49	86.26	134.04	162.65	165.71	
	Total Anual y Gran total, %	23.2%	28.8%	28.8%	17.3%	1.8%	100%
	Acumulado anual, %	23.2%	52.1%	80.9%	98.2%	100.0%	

A continuación se muestra de manera gráfica el monto de inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR:

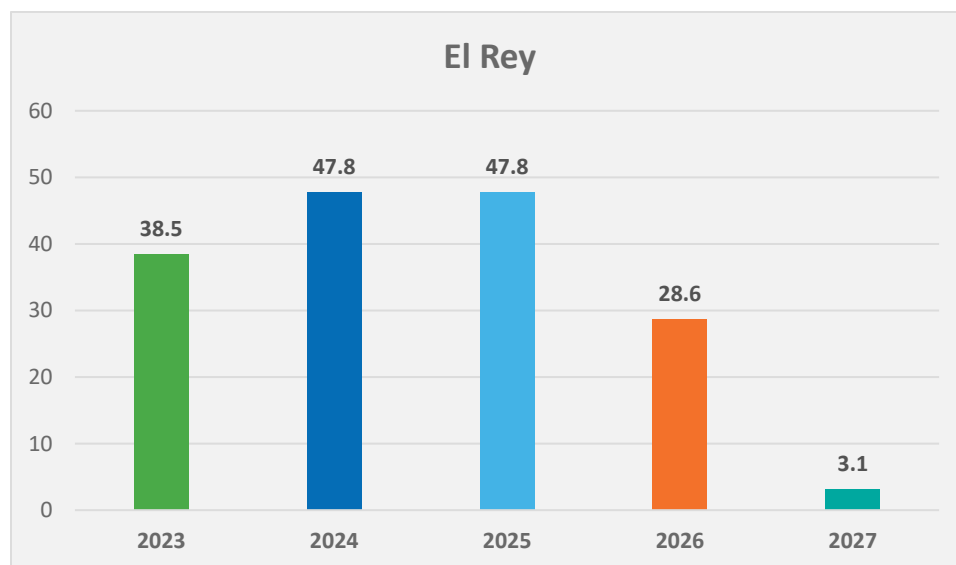


Figura 28 Inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR

Bibliografía

CONAGUA. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. . México: CONAGUA.

GIZ, C. A. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Mexico: GIZ.

Metcalf & Eddy / AECOM. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. NY: McGraw-Hill. GIZ, C. A. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Mexico: GIZ.

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4a ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.

US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Gucumatz

Contenido

PTAR Gucumatz	1
Contenido	4
Índice de Tablas	6
Índice de Figuras.....	8
1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más	10
Descripción general de la PTAR Gucumatz.....	10
Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases	11
Descripción general del proceso	12
Diagrama de flujo de proceso	14
Descripción de las unidades de proceso	16
Tren de Tratamiento de Agua	16
Cárcamo de bombeo	16
Pretratamiento	16
Reactores de lodos activados	16
Clarificador secundario.....	18
Desinfección	19
Disposición y aprovechamiento de agua tratada	20
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua.....	27
Tren de Tratamiento de Lodo.....	29
Digestor aerobio de lodos	29

Desaguado de lodo	30
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de lodo	31
Estado de conservación y operación de las instalaciones.....	34
Análisis de calidad del agua cruda.....	37
Calidad de agua cruda, histórica	37
Calidad de agua cruda, de este Estudio	38
Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada.....	41
Calidad de agua tratada, histórica.....	41
Parámetros de operación del reactor de lodos activados	43
Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua	43
Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR	44
Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) de cada planta.....	44
Estimación de los costos de operación y mantenimiento	46
Observaciones y recomendaciones generales	50
2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	51
Plantas de tratamiento de agua residual de FONATUR	51
PTAR Gucumatz	51
3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	57
Techo financiero	57
Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales	59
Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares	63
Resumen de inversión, techo financiero.....	67
4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	71
Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	71

Aspectos Clave de los Lineamientos	72
Programa de inversión anual	75
Referencias	78

Índice de Tablas

Tabla 1: Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR Gucumatz 1ª Etapa	17
Tabla 2: Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR Gucumatz 2ª Etapa	18
Tabla 3: Dimensiones Clarificador Secundario PTAR Gucumatz	18
Tabla 4: Dimensiones Tanque de Contacto de Cloro PTAR Gucumatz	20
Tabla 5: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua, 1ª Etapa	27
Tabla 6: Dimensiones de Digestor PTAR Gucumatz	29
Tabla 7: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo	32
Tabla 8: Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)	38
Tabla 9: Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente	40
Tabla 10: Análisis estadístico agua tratada	41
Tabla 11: Ubicación de pozos de infiltración PTAR Gucumatz	43
Tabla 12: Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales	46
Tabla 13: Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M	48
Tabla 14: Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Gucumatz	51
Tabla 15: Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Gucumatz	52
Tabla 16: Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio	58
Tabla 17: Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	67
Tabla 18: Monto de inversión, millones de pesos	69

Tabla 19: Estimación detallada de costos PTAR Gucumatx	69
Tabla 20: Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado	75

Índice de Figuras

Figura 1 Vista Aérea PTAR Gucumatz	10
Figura 2 Vista Aérea partes de PTAR Gucumatz.....	11
Figura 3 Diagrama de Flujo de Proceso Actual PTAR Gucumatz – 1ª Etapa	14
Figura 4 Diagrama de Flujo de Proceso Actual PTAR Gucumatz – 2ª Etapa	15
Figura 5 Cárcamo de Bombeo de Agua Cruda y Cribas de Pozo de Gruesos 1ª Etapa	21
Figura 6 Vista general Pretratamiento y Cárcamo de Bombeo 1ª Etapa	21
Figura 7 Cribado Grueso y Canal Parshall 1ª Etapa	21
Figura 8 Sedimentador Primario fuera de operación 1ª Etapa	22
Figura 9 Reactor de Lodos Activados Aireación Superficial 1ª Etapa.....	22
Figura 10 Clarificador secundario 1ª Etapa	22
Figura 11 Tanque de Contacto de Cloro (Tapado) y Caseta de Dosificación de Cloro y Bombas de Agua de Servicios 1ª Etapa	23
Figura 12 Tanques de Cloro y Caseta de Dosificación 1ª Etapa	23
Figura 13 Equipo de Generación de Hipoclorito en Sitio (Fuera de Servicio) 1ª Etapa	23
Figura 14 Pozo de infiltración de agua tratada y Bombas para Reúso 1ª Etapa	24
Figura 15 Cárcamo de Bombeo de Agua Cruda 2ª Etapa	24
Figura 16 Pretratamiento Elevado y Cribado Grueso 2ª Etapa	24
Figura 17 Desarenador Horizontal y Distribución a Reactores de Lodos activados 2ª Etapa ..	25
Figura 18 Reactor de Lodos Activados y Clarificador Secundario 2ª Etapa	25
Figura 19 Reactor de Lodos Activados, Clarificador Secundario y Tanque de Purga de Lodos 2ª Etapa.....	25
Figura 20 Tanque de Contacto de Cloro y Bombas de Agua de Servicio 2ª Etapa.....	26
Figura 21 Sistema de Generación de Hipoclorito In Situ 2ª Etapa	26
Figura 22 Distribución de Agua a Pozos de Infiltración y Pozo de Infiltración 2ª Etapa	26
Figura 23 Digestor Aerobio de Lodos 1ª Etapa	30

Figura 24 Preparador de Polímero y Filtros Banda 1ª Etapa.....	31
Figura 25 Vista General, Caseta de Desaguado 1ª Etapa	31
Figura 26 Caracterización del agua cruda (nov-2022).....	40
Figura 27 Calidad del agua tratada histórico.....	42
Figura 28 Pozos de infiltración PTAR Gucumatz.....	44
Figura 29 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m ³	49
Figura 30 Diagrama de flujo de la PTAR Gucumatz con las acciones propuestas.....	56
Figura 31 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	68
Figura 32 Inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR.....	77

1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más

Descripción general de la PTAR Gucumatz

La PTAR Gucumatz se localiza en la Zona Hotelera de Cancún y proporciona el tratamiento al agua residual de origen municipal y de los usos comercial, servicios y hotelero generadas en su zona de servicio, que corresponde a la franja central de la zona hotelera a lo largo del boulevard Kukulcán. FONATUR es responsable de la operación y mantenimiento de la PTAR, así como del fondeo y/o obtención de los recursos económicos requeridos para su modernización y rehabilitación de la planta y la sustitución de equipos. En la Figura 1 se presenta la vista general satelital de la PTAR Gucumatz.

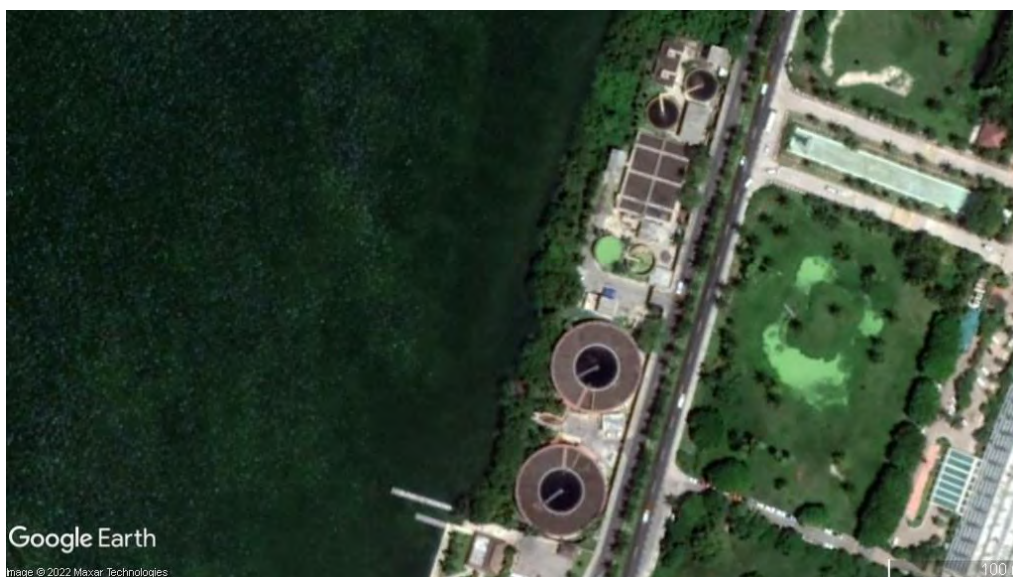


Figura 1 Vista Aérea PTAR Gucumatz

El agua tratada efluente de la PTAR se aprovecha parcialmente por FONATUR en el riego de las áreas verdes públicas situadas en el boulevard Kukulcán, también se comercializa agua tratada con hoteles en la zona de servicio, además se envía agua tratada hacia la PTAR El Rey. El agua tratada excedente se dispone en el subsuelo mediante pozos de infiltración.

Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases

La primera etapa de la PTAR Gucumatz se construyó en el año 1986 y tiene capacidad nominal para tratar un caudal promedio de 200 L/s. De acuerdo con la información de FONATUR, el caudal promedio tratado en el año 2021 fue de 150 L/s.

La segunda etapa de la PTAR Gucumatz se construyó en el 2004 para aumentar la capacidad de tratamiento, por lo que se conforma de dos etapas casi independientes. La Figura 2 muestra la división entre las dos etapas.



Figura 2 Vista Aérea partes de PTAR Gucumatz

Las operaciones independientes que conforman el proceso de tratamiento de agua de las etapas de la PTAR Gucumatz, se enlistan a continuación; entre paréntesis se indican el número de unidades por proceso:

Tren de tratamiento de agua 1ª Etapa:

- + Cárcamo final (1)

- + Pretratamiento: cribado grueso manual (2), desarenador horizontal (2)
- + Canal Parshall (1)
- + Sedimentador primario (2), fuera de operación
- + Reactor de lodos activados con aireación superficial (2)
- + Clarificación secundaria (2)
- + Desinfección con gas cloro, tanque de contacto de cloro (1)

Tren de tratamiento de agua 2ª Etapa:

- + Cárcamo final (1)
- + Pretratamiento: cribado grueso manual (2), desarenado horizontal (2)
- + Reactor de Lodos activados con aireación difusa (2), en estructura concéntrica común con el clarificador
- + Clarificador secundario (2), en el interior de estructura concéntrica
- + Tanque de contacto de cloro (1)
- + Desinfección con gas cloro, tanque de contacto de cloro (1)

Tren de tratamiento de agua compartido por ambas etapas:

- + Cisterna y bombeo de agua tratada para reúso (6)
- + Pozos de infiltración de agua tratada (10)

Tren de tratamiento de lodos compartido por ambas etapas:

- + Digestión aerobia, aireación mecánica (1) ubicada en la zona de la primera etapa
- + Desaguado mecánico, en filtro banda (1) ubicada en la zona de la primera etapa

Descripción general del proceso

El agua cruda influente a cada etapa de la planta se reparte mediante una caja distribuidora a la entrada de la PTAR. En la primera etapa de la PTAR, el agua pasa a un pozo de gruesos con dos cribas manuales para posteriormente pasar al cárcamo de bombeo. El agua bombeada ingresa al pretratamiento elevado, que se compone de cribado grueso, desarenador y un canal Parshall para medición de flujo. La primera etapa de la PTAR, al igual que la PTAR El Rey, cuenta con sedimentadores primarios que fueron deshabilitados por problemas de emisión de olor.

En su lugar, el agua pretratada ingresa directamente a los reactores de lodos activados; dos celdas con tres aireadores superficiales cada una. El licor mezclado pasa hacia los dos clarificadores secundarios y posteriormente al tanque de contacto de cloro, por último, el agua tratada se dirige a pozos de infiltración o para reúso.

Al igual que la PTAR El Rey, el tanque de contacto de cloro se encuentra cubierto y sobre este se ubica la caseta de dosificación de cloro gas. El agua tratada de la segunda etapa puede dirigirse también a esta etapa para ser bombeada hacia los diferentes destinos de reúso.

Respecto al tren de lodos, el digestor aerobio y la caseta de desaguado de lodo se encuentran en la sección de la primera etapa. En el digestor aerobio no se cuenta con una operación específica de espesamiento, en cambio el lodo se espesa dentro del digestor por paros programados de la aireación y decantación dentro del digestor. El agua recuperada de la decantación se retorna al proceso para su tratamiento. El lodo digerido se envía a desaguado en filtro banda y posteriormente se trasporta en camiones hacia la estación central de composteo de FONATUR junto con los residuos orgánicos de las áreas jardinadas comunes de la zona hotelera.

En la segunda etapa de la PTAR, el agua ingresa a un cárcamo de bombeo independiente de la primera etapa, desde el cual el agua es bombeada hacia un pretratamiento elevado. El pretratamiento se compone de cribado grueso y desarenador, en esta etapa no se cuenta con medidor Parshall ni tampoco con sedimentadores primarios, en cambio el agua se dirige directamente hacia los reactores de lodos activados.

El reactor de lodos activados y el clarificador se encuentran dentro de una misma estructura circular concéntrica. En el anillo exterior se encuentra el reactor de lodos activados, con aireación difusa, mientras al centro se encuentra el clarificador secundario. En la estructura se ajustan los tanques y conexiones para optimizar el espacio, y realizar la recirculación de lodo y la purga de lodo. La purga de lodo de cada tanque se dirige al digestor aerobio en la primera etapa.

El agua clarificada efluente de cada clarificador secundario se dirige hacia el tanque de contacto de cloro, donde se junta y se dosifica cloro gas para lograr la desinfección. Posteriormente, el agua se dirige a la cisterna de agua tratada y después es bombeada hacia alguno de los destinos de reúso. El agua no utilizada es conducida hacia alguno de los pozos de infiltración.

Diagrama de flujo de proceso

Para facilitar la comprensión de los procesos, más adelante, en la Figura 3 y Figura 4 se muestran los diagramas de flujo simplificado del proceso actual de tratamiento de agua y lodos de la 1ª y 2ª etapa.

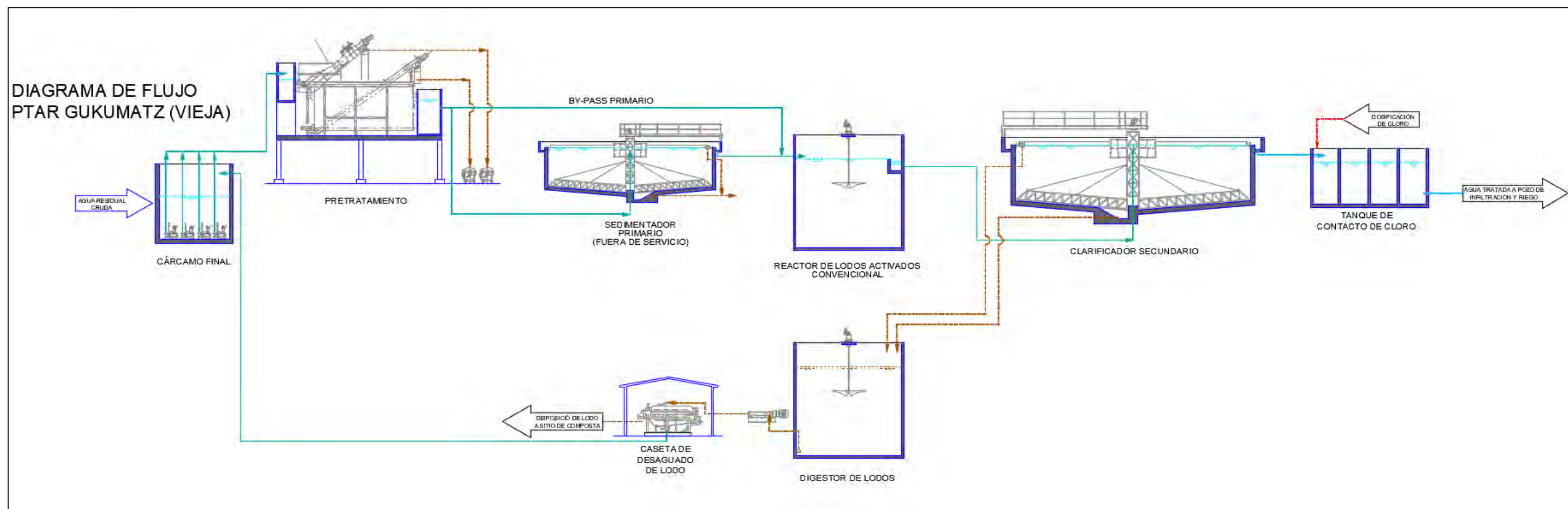


Figura 3 Diagrama de Flujo de Proceso Actual PTAR GucumatZ – 1ª Etapa

DIAGRAMA DE FLUJO
PTAR GUKUMATZ (NUEVA)

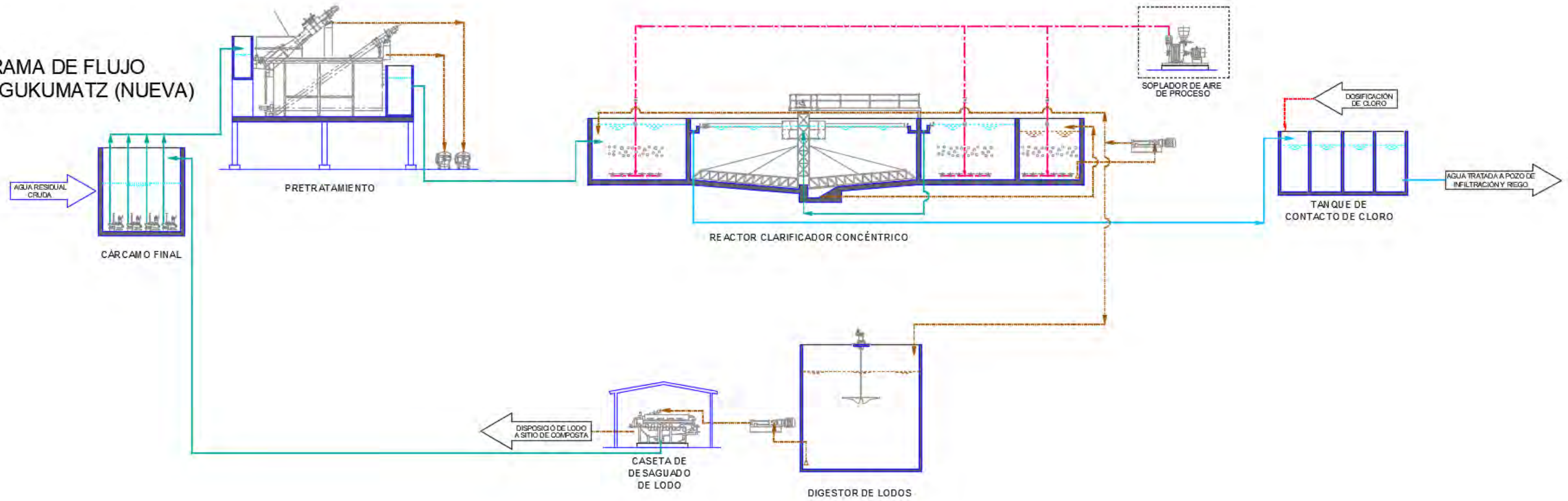


Figura 4 Diagrama de Flujo de Proceso Actual PTAR Gucumatz – 2ª Etapa

Descripción de las unidades de proceso

Como parte del trabajo de campo elaborado en el Estudio, se recopiló información sobre las características, dimensiones y condiciones de operación y mantenimiento de las unidades de proceso, misma que a continuación se presenta dividido por unidad de tratamiento.

Tren de Tratamiento de Agua

Cárcamo de bombeo

Primera etapa: El cárcamo de bombeo (Figura 5) cuenta con un arreglo de tres bombas sumergibles para ingresar el agua al pretratamiento. En la actualidad, se encuentran instaladas dos bombas, la bomba faltante se retiró por problemas de mantenimiento, no obstante, con las dos restantes es suficiente para ingresar agua a la PTAR. El cárcamo de bombeo presenta óxido en las estructuras de soporte y tuberías sin recubrimiento, además de deterioro en algunas de las losas, evidente por las varillas expuestas.

Segunda etapa: El cárcamo de bombeo (Figura 15) cuenta con un arreglo de tres bombas centrífugas horizontales, aunque también se encuentran instaladas solamente dos bombas. La operación de las bombas se hace alternada entre ambas para abastecer de agua a la PTAR. Las instalaciones de este cárcamo se encuentran en buenas condiciones.

Pretratamiento

Primera etapa: El pretratamiento (Figura 6 y Figura 7) se conforma de dos canales de cribado grueso, dos canales de desarenación y un canal Parshall. El personal de operación no reporta problemas de operación en esta zona, aunque se observa el deterioro por oxidación de las tuberías, rejas de cribado y de soporte.

Segunda etapa: el pretratamiento (Figura 16 y Figura 17) se conforma de dos canales de cribado grueso seguido de desarenación. Al igual que en la primera etapa no se reportan problemas de operación en esta zona. No se observa deterioro importante en esta zona.

En ambas estructuras de pretratamiento, los claros libres entre barras del cribado y los canales de desarenación son más pequeños que lo ordinario en plantas de tamaños similares, lo que provoca una ineficiencia en la recolección de arenas y basuras. Además, que, al tratarse de recolección manual, se limita la remoción de estos.

Reactores de lodos activados

Primera etapa: El agua pretratada se distribuye por un vertedor a alguno de los dos reactores de lodos activados de mezcla completa (Figura 9). Cada reactor cuenta con tres aireadores superficiales montados sobre los puentes de operación. El retorno de lodo regresa por una tubería común y cuenta con posibilidad de alimentarse a cualquiera de los dos reactores.

Más allá de los problemas asociados a la aireación superficial, como la formación de aerosoles, la distribución del aire y la eficiencia energética, el reactor funciona correctamente. Se observa deterioro leve en algunos pasillos de operación, con la exposición de la varilla de refuerzo y deterioro medio en tuberías de conducción y vertedores. Las dimensiones de los reactores se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1:
Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR Gucumatz 1ª Etapa

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	2
Largo	m	36.0
Ancho	m	25.0
Tirante hidráulico	m	3.9
Volumen total	m ³	3,510

Actualmente se está implementando el cambio de aireación superficial a aireación difusa, además se están instalando tres sopladores tipo turbo marca Kaeser. El monto total invertido en estas obras por FONATUR es de 32 millones de pesos, que incluyen también la rehabilitación de los clarificadores secundarios de la primera etapa y el cambio a la aireación difusa en la digestión de lodos.

Segunda etapa: El agua pretratada de la segunda etapa entra a una caja de distribución desde donde se conduce a alguno de los dos reactores de lodos activados. En esta etapa, el reactor de lodos activados se encuentra en la estructura común con el clarificador (Figura 18 y Figura 19) y es de aireación difusa. Una ventaja de esto es la forma anular del reactor, que contribuye a disminuir cortocircuitos y mejora la eficiencia del proceso. Las dimensiones del reactor se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2:
Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR Gucumatz 2ª Etapa

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	2
Diámetro total	m	40
Área por Reactor de Lodos Activados	m ²	910
Tirante hidráulico	m	4
Volumen por reactor	m ³	3,640

Clarificador secundario

Primera etapa: Se cuenta con dos clarificadores secundarios, correspondientes a cada uno de los reactores de lodos (Figura 10). Una batería de bombas común toma el lodo para recircular y/o purgar lodo mediante un arreglo de válvulas. Los clarificadores son de puente fijo y tracción central. Ambos presentan deterioro en todas las estructuras metálicas, siendo más crítico en uno de los sedimentadores, cuyo pasillo de operación presenta fisuras en la lámina.

Como se mencionó previamente en el mes de octubre se sustituyeron las tornamesas, rastras e internos de ambos clarificadores y ya se encuentran en operación las dos unidades. Las dimensiones de ambos tipos de clarificadores se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3:
Dimensiones Clarificador Secundario PTAR Gucumatz

Concepto	Unidad	Clarificador 1ª etapa	Clarificador 2ª etapa
Diámetro	m	15.0	19.5
Número de unidades	No.	2	2
Área	m ²	176.7	298.6
Tirante hidráulico, SWD	m	3.5	3.5

Segunda etapa: El clarificador en la segunda etapa se encuentra al centro de la estructura concéntrica común con el reactor (Figura 18 y Figura 19). El lodo secundario se manda hacia el tanque de lodo inmediato, desde donde una bomba toma lodo para mandarlo al retorno o a la purga mediante un juego de válvulas. El tanque de lodos se encuentra aireado también para evitar olores y presenta una manera de almacenar lodo y dar flexibilidad de operación.

De acuerdo con el personal de operación, el reactor de lodos activados tiene un límite en su diseño hidráulico y no puede recibir grandes picos de caudal. Esto se debe a las cargas de los vertedores del reactor de lodos activados y efluente del clarificador secundario tienen margen de seguridad pequeño, haciendo que se inunden al exceder cierto caudal. En otras palabras, se presenta una limitante en el clarificador secundario por lo que no se pueden ingresar caudales mayores.

Desinfección

Primera etapa: El agua de cada clarificador se dirige hacia el tanque de contacto de cloro (Figura 11). Al igual que la PTAR El Rey, el tanque de contacto de cloro se encuentra tapado y sobre este se ubica la caseta de dosificación de cloro. Después del tanque de contacto de cloro se encuentra una cisterna de agua tratada, desde donde se obtiene agua para los diferentes servicios de la PTAR.

Las PTAR cuenta con sistema de generación de hipoclorito in situ (Figura 13), mismo que está fuera de operación desde hace varios años, esto debido a que no logró el desempeño esperado, por problemas en la calidad del agua de suministro y el tipo y calidad de la sal a utilizar. En su lugar se utiliza cloro gas, de los cuales la PTAR cuenta con 3 en stock (Figura 12).

Los tanques de cloro gas para desinfección se encuentran colocados a un lado del sistema de generación de hipoclorito (Figura 12). La dosificación de cloro se realiza mediante un clorinador colocado directamente a la salida del tanque. Los tanques presentan algo de óxido en su exterior y no cuentan con grúa o báscula. Aunque no se reportan obstáculos o problemas de operación en esta unidad, la instalación de los tanques de cloro de esta manera representa un riesgo de trabajo.

Segunda etapa: El tanque de contacto de cloro se encuentra cercano a la entrada de la PTAR. El tanque se encuentra tapado y sobre este se ubica el sistema de generación de hipoclorito in sitio, aunque se encuentra fuera de servicio (Figura 21). Los tanques de almacenamiento de gas cloro se encuentran en el exterior del tanque, de igual manera cuentan solamente con un dosificador ajustado directamente al tanque, sin básculas ni medidas de seguridad adicionales. Este tanque cuenta con sus propias bombas de agua de servicio.

En general, ambos sistemas de dosificación presentan deterioro medio, aunque el principal aspecto a considerar tiene que ver con la seguridad del manejo de este sistema, pues se encuentra prácticamente a la intemperie o cerca de áreas donde se ubican los operadores. Además, el sistema de generación de hipoclorito representa un estorbo en ambas casetas.

Las dimensiones del tanque de contacto de cloro de las dos etapas de muestran en la Tabla 4.

Tabla 4:
Dimensiones Tanque de Contacto de Cloro PTAR Gucumatx

Concepto	Unidad	1ª Etapa	2ª Etapa
Largo	m	16	14
Ancho	m	10	7
Tirante hidráulico*	m	2	2
Volumen	m ³	320	196

*Valor supuesto

Disposición y aprovechamiento de agua tratada

De cualquiera de los tanques de contacto de cloro el agua tratada se dirige por diversas tuberías a alguno de los pozos de infiltración (Figura 14 y Figura 22). El agua tratada es utilizada para regar la parte central de la zona hotelera y además tiene posibilidad de a algunos hoteles de la zona. Además, existe la posibilidad de mandar agua tratada hacia la PTAR El Rey. Algunos de las baterías de bombas cuentan con filtro tipo Amiad.

Vistas del tren de tratamiento de agua

De la Figura 5 a la Figura 14 muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de agua de la 1ª etapa de la PTAR; en tanto que las imágenes de la Figura 15 a la Figura 22 corresponden a la unidades del tren de agua de la 2ª etapa.



Figura 5 Cárcamo de Bombeo de Agua Cruda y Cribas de Pozo de Gruesos 1ª Etapa



Figura 6 Vista general Pretratamiento y Cárcamo de Bombeo 1ª Etapa



Figura 7 Cribado Grueso y Canal Parshall 1ª Etapa



Figura 8 Sedimentador Primario fuera de operación 1ª Etapa



Figura 9 Reactor de Lodos Activados Aireación Superficial 1ª Etapa



Figura 10 Clarificador secundario 1ª Etapa



Figura 11 Tanque de Contacto de Cloro (Tapado) y Caseta de Dosificación de Cloro y Bombas de Agua de Servicios 1ª Etapa



Figura 12 Tanques de Cloro y Caseta de Dosificación 1ª Etapa



Figura 13 Equipo de Generación de Hipoclorito en Sitio (Fuera de Servicio) 1ª Etapa



Figura 14 Pozo de infiltración de agua tratada y Bombas para Reúso 1ª Etapa



Figura 15 Cárcamo de Bombeo de Agua Cruda 2ª Etapa



Figura 16 Pretratamiento Elevado y Cribado Grueso 2ª Etapa



Figura 17 Desarenador Horizontal y Distribución a Reactores de Lodos activados 2ª Etapa



Figura 18 Reactor de Lodos Activados y Clarificador Secundario 2ª Etapa



Figura 19 Reactor de Lodos Activados, Clarificador Secundario y Tanque de Purga de Lodos 2ª Etapa



Figura 20 Tanque de Contacto de Cloro y Bombas de Agua de Servicio 2ª Etapa



Figura 21 Sistema de Generación de Hipoclorito In Situ 2ª Etapa



Figura 22 Distribución de Agua a Pozos de Infiltración y Pozo de Infiltración 2ª Etapa

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua

Con el fin de verificar que las principales estructuras de proceso del tren de tratamiento de agua sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes en el agua cruda, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para tal efecto se utilizaron las dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior, los datos de caudal y calidad de agua cruda utilizados son los siguientes:

- + Caudal medio de diseño, 200 L/s
 - 1a etapa, 100 L/s
 - 2a etapa, 100 L/s
- + Calidad de agua cruda promedio (histórico)
 - DBO, 130 mg/L
 - SST, 135 mg/L

En la Tabla 5 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de agua de la 1a y 2a etapa, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR Gucumatz con las dimensiones de las estructuras, en caso de no contar con algún dato de operación se asignó un valor promedio del rango típico.

El rango típico de referencia utilizado para los reactores y clarificación secundaria es el de procesos de lodos activados de mezcla completa para remoción de DBO y nitrificación.

Tabla 5:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua, 1ª Etapa

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Gucumatz 1a etapa	Valor PTAR Gucumatz 2a etapa
Reactor de Lodos Activados				
Concentración de SSTLM	mg/L	1,500 a 4,000	2,500	3,500
Fracción volátil		0.7 a 0.8	0.75	0.75
Relación F/M	kg/kg - d	0.2 a 0.6	0.17	0.06

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Gucumatx 1a etapa	Valor PTAR Gucumatx 2a etapa
Carga volumétrica	KgDBO/m ³ - d	0.3 a 1.6	0.32	0.15
Tiempo hidráulico de retención total	horas	5 a 15	9.8	20
Tirante hidráulico	m	4.5 a 7.5	3.9	4.0
Clarificador Secundario				
Carga hidráulica superficial, Caudal medio	m ³ /m ² -d	16 a 28	24.4	14.5
Recirculación	%	25 a 100%	100%	100%
Carga de sólidos, Caudal medio	Kg/m ² - h	4 a 6	5.1	4.2
Tirante hidráulico	m	4 a 5	3.5	3.5
Tanque de contacto de cloro				
Tiempo hidráulico de retención	min	30	53	32.7

¹ Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + Los principales criterios de diseño del reactor de lodos activados y clarificador secundario de la 1a etapa se encuentran dentro o muy cerca de los rangos típicos establecidos en la bibliografía especializada para lodos activados de mezcla completa. Su única limitante es el tirante hidráulico que está abajo del rango recomendado. El bajo tirante en los reactores ocasiona que la transferencia de aire sea ineficiente.
- + Los valores obtenidos de F/M y carga volumétrica para los reactores de lodos activados y la carga hidráulica de los clarificadores de la 2a etapa están muy por debajo de los rangos típicos utilizados para reactores de mezcla completa, además el tiempo hidráulico de retención es muy alto. Por lo anterior se asume que fueron diseñados en la modalidad de aereación extendida en donde los tiempos de retención típicos en los

reactores son de 20 a 30 horas y los rangos típicos de F/M, carga hidráulica en los clarificadoras son más bajos.

- + Acorde al tiempo hidráulico de retención, el tanque de contacto de cloro de la 1a etapa tiene capacidad para tratar casi la totalidad del flujo de diseño de la PTAR. El tanque de contacto de cloro de la 2a etapa cumple con el tiempo hidráulico de retención para tratar la mitad del caudal.

Tren de Tratamiento de Lodo

Digestor aerobio de lodos

La purga de lodo secundario, de cualquiera de las dos etapas de tratamiento se dirige hacia el digestor aerobio de lodos (Figura 23). El digestor cuenta con aireación de tipo superficial, como se mencionó antes, actualmente se está implementando la sustitución por aireación difusa.

Aunque no hay operación de espesado mecánico, los operadores realizan el espesado de lodo dentro de la misma unidad mediante paros programados a la aireación y decantación del agua. La instalación en general, obra civil y agitadores se encuentran en buen estado, aunque la aireación superficial acarrea ciertos problemas operativos ya mencionados. En la Tabla 6 se presentan las dimensiones de esta unidad.

Tabla 6:
Dimensiones de Digestor PTAR Gucumatx

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	1.0
Largo	m	20.0
Ancho	m	10.0
Tirante hidráulico	m	3.9
Volumen total	m ³	780

Desaguado de lodo

El desaguado de lodo digerido se efectúa con un filtro banda de 1.5 metros de ancho de banda, en funcionamiento durante la visita (Figura 24). Aunque el equipo funciona correctamente, se requiere su cambio por uno de mayor tamaño, dado que se encuentra cercano a su capacidad máxima. En promedio, y de acuerdo con el personal de operación, el equipo opera de 20 a 24 horas por día, los 7 días de la semana.

Cuenta con un equipo de preparación de polímero similar al de las otras PTAR de FONATUR, que consiste en un tanque plástico de 1,200 litros con un agitador hechizo (Figura 24). La cantidad de polímero preparado varía según la producción de lodo, pero el personal de operación comenta que se preparan 2 lotes diarios. El lodo digerido se almacena temporalmente en la tolva de lodos en espera del camión recolector de lodos.

Vistas del tren de tratamiento de lodo

Las imágenes del tren de tratamiento de lodos, común para ambas etapas, se presentan de la Figura 23 a la Figura 25.



Figura 23 Digestor Aerobio de Lodos 1ª Etapa



Figura 24 Preparador de Polímero y Filtros Banda 1ª Etapa



Figura 25 Vista General, Caseta de Desaguo 1ª Etapa

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de lodo

Con el fin de verificar que las principales estructuras y equipos de proceso del tren de tratamiento de lodo sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño más relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para esta evaluación se consideraron las siguientes premisas de cálculo:

- + Dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior
- + Producción de lodos, se estimó con base en la fórmula simplificada de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) con los datos de caudal medio de diseño y calidad de agua cruda promedio del histórico (SST y DBO),

mismos que se utilizaron para la evaluación del tren de agua (US EPA, 1993).

- + Si bien no hay operación de espesado mecánico, para determinar el volumen de lodos se asume la concentración en el digestor es del 1.5%, dada la operación de decantado que se efectúa dentro del mismo digestor.
- + De manera conservadora, se consideró que el equipo mecánico de desaguado opera 5 días por semana 16 horas por día.
- + En la Tabla 7 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de lodo, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR Gucumatx con las dimensiones de las estructuras y capacidades de equipos, en caso de no contar con algún dato de operación se consideró un valor promedio del rango típico.

Tabla 7:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Gucumatx
Producción de lodo			
Producción de lodo esperada	kg SST /día	No aplica	2,061
Concentración (ya espesado)		0.5 a 1.5%	1.5%
Flujo volumétrico	m ³ /día	No aplica	137
Digestión Aerobia de lodo			
Carga de sólidos volátiles	kgSSV/m ³ -d	1.6 a 4.8	2.0
Tiempo de retención hidráulico (edad de lodo, ≈ 28°C)	días	18 a 20	5.7
Destrucción esperada		38 a 50%	<20%
Masa de lodo digerido estimada	kg SST /día		1,752
Desaguado de Lodo (filtro banda)		No aplica	

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Gucumatz
Ancho de banda	m	1 a 3	1.5
Carga de sólidos (por metro)	kg/h	250 a 410	102
Carga hidráulica (por metro)	L/min	150 a 340	134

¹ Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + A la condición evaluada, el digestor aerobio de lodos no cuenta con volumen suficiente para mantener la edad de lodos recomendada (15 y 20 días).
- + Es recomendable incluir una unidad de espesado mecánico para reducir el volumen influente al digestor e incrementar la edad de lodos.
- + A la condición evaluada, teóricamente el filtro banda opera con cargas de sólidos adecuadas para su correcto funcionamiento, sin embargo, el personal de la PTAR indica que el filtro banda opera los siete días de la semana, 20 o 24 horas por día.

Estado de conservación y operación de las instalaciones

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de agua de la PTAR Gucumatx, evaluadas con base en el cumplimiento de la NOM-001-2021 para suelo cárstico en DQO, SST, NT y PT con el promedio histórico de calidad de agua, se clasifican como **“Buenas”**. En la sección **Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada**, se presenta la evaluación de dicha información.

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de lodos, determinadas con base en las condiciones operativas y de desempeño de las operaciones de digestión y desaguado observadas en la visita, se clasifican como **“Regulares”**.

En términos generales las condiciones de mantenimiento de los trenes de tratamiento de agua y de lodos se consideran **“Regulares”**.

En los párrafos subsecuentes se describe lo observado en la visita técnica efectuada a la planta. La PTAR El Gucumatx comparte muchos detalles de diseño y operación con la PTAR El Rey, por lo que gran parte de las restricciones operativas se observan también en esta PTAR.

La 1a etapa de la PTAR Gucumatx es una instalación de tratamiento vieja, con 38 años en operación a partir del año 1984, mientras que la 2a etapa, construida en el año 2004, tiene ya 18 años en operación. El diseño de sus operaciones y procesos, en especial las de la 1a etapa, así como las dimensiones y características físicas de las unidades responden a criterios, prácticas y objetivos de tratamiento obsoletos o ya no aplicables, destacan los siguientes aspectos:

- + Cribado de desbaste y en pretratamiento de operación manual
- + Canal de desarenado insuficiente para las necesidades de la planta
- + Aireación mecánica en los reactores de lodos activados
- + Bajo tirante hidráulico en los reactores de lodos activados
- + Baja profundidad de pared lateral en los clarificadores secundarios
- + Caseta de cloración abierta

La segunda etapa de la PTAR, con diseño más reciente y pensado para optimizar el uso del espacio existente, presenta también algunas limitantes:

- + Cribado de desbaste y en pretratamiento de operación manual
- + Canal de desarenado insuficiente para necesidades de la planta
- + Insuficiente capacidad para manejo de flujos pico por carga hidráulica de clarificador secundario
- + Caseta de cloración abierta

+ Con respecto al tren de lodos, compartido por ambas etapas destacan los siguientes aspectos:

- + Carece de unidad de espesado de lodos formal
- + Volumen insuficiente en el digestor aerobio de lodos
- + Aireación mecánica en el digestor aerobio de lodos

Adicional a lo anterior, en la visita de campo se observaron los problemas e insuficiencias que a continuación se indican:

1a etapa PTAR Gucumatx:

- + Equipos de bombeo del cárcamo de agua cruda y del pretratamiento sin capacidad con para manejar los caudales picos horarios, falta la instalación de una de las bombas de agua cruda.
- + Problemas de corrosión en tubería de conducción de agua cruda a pretratamiento, así como rejillas y soportes en esta zona.
- + Los sedimentadores primarios fuera de operación y con deterioro severo del equipamiento mecánico e internos de los tanques. Esto aumenta la carga orgánica influente a los ya limitados reactores.
- + Clarificadores secundarios con deterioro severo soportes y pasillo de puente de operación.
- + El tanque de contacto de cloro está cubierto por losa de concreto, lo que impide su inspección y dificulta las labores de mantenimiento.
- + Carencia de equipo de monitoreo y manejo seguro del gas cloro, almacenado en tanques de 908 kg.
- + Presencia de equipo de generación de hipoclorito in situ, que se encuentra fuera de servicio e inoperativo, obstaculizando la operación en la caseta de dosificación de cloro.

2ª etapa PTAR Gucumatx:

- + Equipos de bombeo del cárcamo de agua cruda y del pretratamiento sin capacidad con para manejar el caudal pico horario, falta instalar una bomba de agua cruda.
- + Corrosión en tuberías de conducción de agua pretratada a reactores.
- + Desprendimiento de enjarre y exposición de acero de refuerzo en paredes internas del reactor de lodos activados.
- + Fisuras en mampara central de sedimentador secundario, se observa crecimiento de hierba.
- + El tanque de contacto de cloro está cubierto por losa de concreto, lo que impide su

inspección y dificulta las labores de mantenimiento.

- + Carencia de equipo de monitoreo y manejo seguro del gas cloro, almacenado en tanques de 908 kg.
- + Equipo de generación de hipoclorito in situ, que se encuentra fuera de servicio e inoperativo, obstaculizando operación en la caseta de dosificación de cloro.

Tren de Lodos PTAR Gucumatx:

- + Fisuras y exposición de acero de refuerzo en diversas zonas del tanque digestor.
- + Equipo de desaguado de lodos insuficiente.

Con respecto al equipamiento mecánico se observa lo que a continuación se describe:

- + Las rastras, tornamesas e internos de los clarificadores secundarios registran condiciones moderadas de deterioro.
- + El cárcamo de agua cruda tiene solo dos equipos de bombeo instalados y operando, se requiere el tercer equipo, y asegurar la capacidad requerida para el caudal pico horario.
- + Los equipos de bombeo de agua para reúso por Fonatur y usuarios privados se observan un tanto viejos, requieren sustituirse por nuevos equipos con mejor desempeño y eficiencia energética.
- + Los equipos de bombeo del tren de lodos (recirculación y purga, natas secundarias y lodo digerido), aunque todos están operativos y con adecuado mantenimiento, son equipos que requieren ser sustituidos a corto/mediano plazo, en algunos se observa, y lo confirmo el personal, que los motores se tomaron de otros equipos y plantas.
- + Los aireadores superficiales del reactor de lodos activados y digestor de lodos muestran deterioro moderado por los años y las condiciones ambientales, requieren sustitución por nueva tecnología.
- + El sistema de preparación de polímero para desaguado de lodo requiere sustitución.
- + El filtro banda para desaguado de lodo, si bien está en operación, muestra deterioro en sus elementos mecánicos, lo que afecta su operación y desempeño. Es muy conveniente sustituirlo.

En general, la obra civil de tanques, edificaciones, vialidades y las áreas verdes se observan con condiciones de mantenimiento de regulares a buenas; lo mismo aplica para las diversas tuberías de conducción de agua y de lodos.

Otra condición desfavorable comunicada por FONATUR es la insuficiente capacidad de infiltración de los pozos de agua tratada, ocasionado por la ubicación del sitio en que se construyó la planta, colindante con la laguna Nichupté. Esta situación obliga a que una fracción del caudal de agua tratada de la PTAR Gucumatx se envíe por bombeo hacia la PTAR El Rey.

Se percibe el esfuerzo del personal por mantener la planta en condiciones operativas y de aspecto aceptables, lo anterior no obstante las restricciones de recursos materiales y económicos.

En el Anexo 1 (Ficha de la PTAR) se presenta la descripción detallada de las características y condiciones actuales de operación y mantenimiento de las estructuras y equipos del tren de agua y lodos.

Análisis de calidad del agua cruda

Calidad de agua cruda, histórica

Se incluyen diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos, la información fue proporcionada por FONATUR, los análisis fueron efectuados por un laboratorio acreditado ante la EMA. Se proporcionaron datos de ocho muestreos de tipo simple efectuados en el influente durante el periodo del año 2020 al 2021. Los datos de calidad de agua cruda y tratada proporcionados por el organismo operador se encuentran en el apartado Bases de Datos.

Los parámetros incluidos en las bases de datos de FONATUR son los siguientes:

- + Temperatura
- + Potencial de hidrógeno (pH)
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos sedimentables
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO_2)
- + Nitrógeno de nitratos (NO_3)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)
- + Coliformes fecales
- + Huevos de helminto

Debido a que los resultados de los muestreos fueron previos a la actualización de la NOM-001-SEMARNAT-2021, las bases de datos no incluyen los parámetros adicionales de la nueva norma, como color verdadero, toxicidad y *E. Coli*, así mismo incluyen parámetros que no son objeto de estudio en la actual norma, sin embargo, si permiten determinar la calidad de los procesos de tratamiento del agua residual.

A continuación se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Gucumatx.

Tabla 8:
Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)

Concepto	pH	G & A mg/L	SST mg/L	DBO mg/L	DQO mg/L	NT mg/L	NTK mg/L	PT mg/L	Coliformes fecales NMP/100 mL
No. de datos	8	8	8	8	8	6	8	7	8
Mínimo	6.1	11.1	33	59	121	2.21	0.63	1.36	75
1° Cuartil	6.6	12.7	50	67	137	3.13	2.41	1.51	94
Promedio	7.2	17.3	135	130	271	5.34	4.29	2.01	1,008
Mediana	7.3	16.7	125	134	277	4.56	3.90	1.67	780
3° Cuartil	7.7	21.3	206	163	374	7.08	5.40	2.43	2,151
Máximo	7.9	26.8	326	248	505	11.70	9.72	3.76	2,400

Calidad de agua cruda, de este Estudio

Del 10 al 11 de noviembre se efectuó un muestreo compuesto de 24 horas en el influente de la PTAR Gucumatx, este se efectuó con seis muestras simples, a cada una de estas se les realizaron los siguientes análisis de campo:

- + pH
- + Temperatura del agua

Los parámetros analizados en el laboratorio fueron los siguientes:

- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO_2)
- + Nitrógeno de nitratos (NO_3)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)
- + Huevos de helminto
- + Color verdadero (UV-Vis) a 436, 525 y 620 nm

Las actividades de colecta, preservación y análisis de las muestras fueron realizadas por personal de Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis (Intertek + ABC Analytic), éste cuenta con la acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA) en la rama de agua número AG-096-029/11 para su laboratorio ubicado en la ciudad de México y AG-096-029/11_S1 para el laboratorio de Mérida, que es donde se realizarán los análisis.

En todos los casos, la preservación y el almacenamiento de las muestras se efectuaron de acuerdo con los lineamientos que establece la normatividad mexicana. Las muestras colectadas fueron preservadas con hielo a una temperatura de 4°C con la intención de que no se degradaran, y fueron transportadas en una hielera al laboratorio correspondiente para su análisis.

El transporte se hizo con sumo cuidado, de tal forma que se evitaron los derrames y/o contaminación de muestras debido a rupturas de frascos o cualquier otro accidente.

Los diferentes frascos que integran las muestras se preservaron con los reactivos señalados en la normatividad.

En la Figura 26 se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Gucumatz. En el Anexo 3 se presentan los resultados completos del laboratorio.

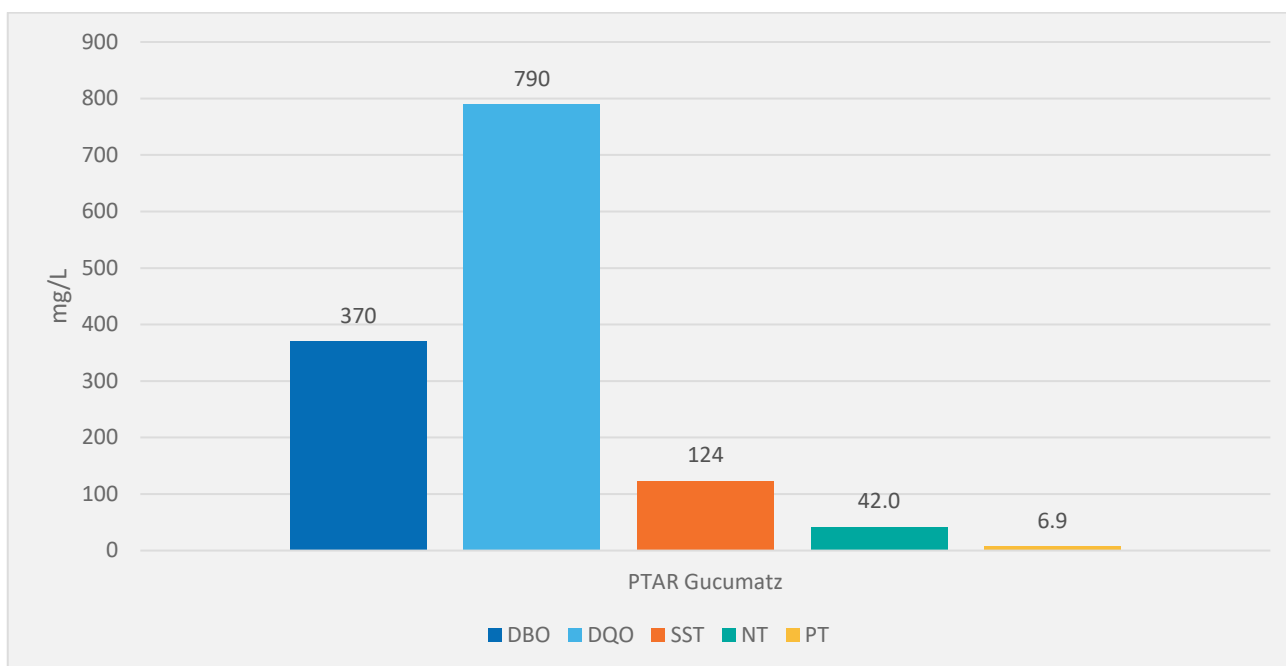


Figura 26 Caracterización del agua cruda (nov-2022)

Con la finalidad de conocer la relación de contaminantes, se realizaron los cálculos que a continuación se presentan en la siguiente tabla, los cuales fueron determinados con los valores promedio del 2020-2021 y los valores obtenidos en este Estudio.

Tabla 9:
Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente

Relación	Promedio (2020-2021)	Valor Estudio	Rango típico en Aguas Residuales Municipales ¹
DBO5/ DQO	0.48	0.47	0.45 – 0.55
SST/ DBO	1.03	0.34	0.80 – 1.20
NTK/ DBO	0.04	0.11	0.10 – 0.20
Fósforo/ DBO	0.02	0.02	0.02

¹ (US EPA, 1993)

De las relaciones anteriores resalta NTK/DBO del promedio histórico de FONATUR, el valor de

NTK es muy bajo en relación a la DBO, probablemente existe error en su determinación. En los resultados obtenidos en este Estudio la relación de SST/DBO fue muy baja, el resto de relaciones se encuentran dentro del rango típico de aguas residuales municipales.

Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada

En la siguiente tabla y figura se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada del histórico de datos proporcionados por FONATUR, en estas se presentan los límites permisibles (LP) establecidos en la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelo cárstico. Por indicaciones de FONATUR no se efectuó análisis del agua tratada de la PTAR Gucumatz ya que esta se encontraba en rehabilitación.

Calidad de agua tratada, histórica

Se proporcionaron datos de 146 muestreos efectuados en el efluente durante el periodo del año 2020 al 2021, la mayoría de tipo compuesto.

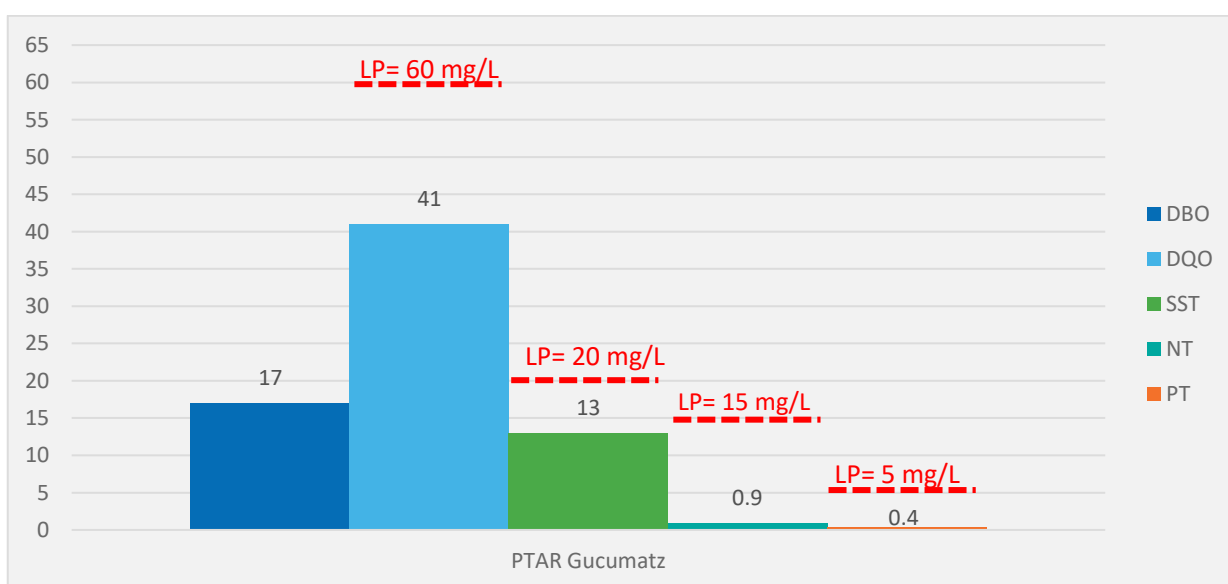
En la siguiente tabla se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros en el agua tratada de la PTAR Gucumatz.

Tabla 10:
Análisis estadístico agua tratada

Concepto	G & A mg/L	SST mg/L	DBO mg/L	DQO mg/L	NT mg/L	NTK mg/L	PT mg/L	Huevos de helminto huevos/L	Coliformes fecales NMP/100 mL
No. de datos	146	146	146	146	146	146	145	146	146
Mínimo	5.0	6	8	23	0.54	0.43	0.25	0	3
1° Cuartil	5.8	8	12	30	0.63	0.63	0.30	0	7
Promedio	5.9	13	17	41	0.86	0.79	0.43	0	63
Mediana	5.8	13	16	40	0.84	0.73	0.56	0	33

Concepto	G & A mg/L	SST mg/L	DBO mg/L	DQO mg/L	NT mg/L	NTK mg/L	PT mg/L	Huevos de helminto huevos/L	Coliformes fecales NMP/100 mL
3° Cuartil	6.4	18	23	47	1.09	0.98	0.56	0	100
Máximo	6.4	27	32	67	1.41	1.30	0.56	0	585

A manera de resumen en la Figura 27 se presentan los valores promedio de los principales parámetros del agua tratada de la PTAR Gucumat, en esta se indican los límites permisibles (LP) para el promedio mensual en la NOM-001-2021.



LP = Límite permisible

Figura 27 Calidad del agua tratada histórico

Como se observa en la figura y tabla previa, el agua tratada de la PTAR Gucumat cumple con los límites permisibles de la NOM-001-2021 en todos los parámetros monitoreados en el registro histórico. El valor de nitrógeno en el agua tratada es atípicamente bajo, es probable que exista un error en su determinación, al igual que en el agua cruda.

Parámetros de operación del reactor de lodos activados

No se realizaron análisis de campo de oxígeno disuelto y sólidos sedimentables en los reactores de lodos activados debido a que la PTAR estaba en trabajos de rehabilitación.

Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua

Como parte de las actividades realizadas en campo, se registraron las coordenadas de los pozos de infiltración de cada PTAR, utilizando un equipo GPS map 60Cx marca Garmin. En la Tabla 11 se presentan las coordenadas de localización de los pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR Gucumatz. Posteriormente, en la Figura 28 se presentan fotografías correspondientes al levantamiento de las coordenadas con GPS y de los registros o brocales de los pozos de infiltración.

Tabla 11:
Ubicación de pozos de infiltración PTAR Gucumatz

Concepto	Latitud	Longitud
Pozo de infiltración 1	21.07805	-86.77700
Pozo de infiltración 2	21.07690	-86.77719
Pozo de infiltración 3	21.07661	-86.77728
Pozo de infiltración 4	21.07636	-86.77737
Pozo de infiltración 5	21.07739	-86.77703
Pozo de infiltración 6	21.07790	-86.77687



Figura 28 Pozos de infiltración PTAR Gucumatz

Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR

Pendiente de incorporar, no se ha recibido la información por parte de FONATUR.

Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) de cada planta

De acuerdo a la información proporcionada por FONATUR, el costo total de O & M de la PTAR Gucumatz en el año 2021 fue de 9.94 millones de pesos (mdp's), desagregado de la siguiente forma:

+ Costo de operación:	7.94 mdp's
+ Costo de mantenimiento:	2.01 mdp's

Considerando que el caudal medio de agua tratada en el año 2021 fue de 150 L/s, que representan un volumen anual de 4,730,400 m³, el costo unitario de O & M es de 2.10 \$/m³ de agua tratada.

En relación a la energía eléctrica consumida en el proceso de tratamiento, la información proporcionada indica los siguientes valores anuales:

+ Consumo anual de energía:	2,836,788 kWh
-----------------------------	---------------

+ Costo anual: \$ 8,027,004

A partir de los valores previos se calcularon los siguientes indicadores:

+ Costo unitario de la energía.	2.83 \$/kWH
+ Consumo unitario de energía:	0.60 kWh/m ³
+ Costo energía respecto al costo O & M:	81 %

En la información de costo de O & M, así como la de consumo y costo de energía eléctrica se debe tener en cuenta que la PTAR Gucumatz incluye, además de los trenes de agua y lodo, las siguientes instalaciones:

- + Cárcamo final de bombeo de agua residual,
- + Bombeo de agua tratada para uso en riego de áreas verdes públicas por FONATUR,
- + Bombeo del agua tratada que se comercializa con usuarios particulares,
- + Bombeo (eventual) de agua residual a PTAR El Rey,
- + Bombeo (eventual) de agua tratada a cisterna de agua tratada de PTAR El Rey.

Estimación de los costos de operación y mantenimiento

A efecto de comparar el costo de operación reportado por FONATUR contra un costo de referencia se procedió a estimar los costos anuales de un grupo de insumos relevantes:

- + Energía eléctrica,
- + Cloro para desinfección,
- + Polímero para espesado y/o desaguado de lodo,
- + Acarreo de lodo desaguado, y
- + Análisis de laboratorio de agua tratada y lodo para cumplimiento normativo y control de proceso
- + Personal de O & M

Para lo anterior, con base en un caudal medio de 150 L/s y la información de calidad de agua cruda y tratada proporcionada por FONATUR se efectuó un balance de materia simplificado para establecer la masa de DBO removida, la generación de lodos en el proceso de tratamiento, la remoción de sólidos suspendidos volátiles en el proceso de digestión y la masa de lodo desaguado a disposición.

Una vez definidos en el balance de materia los valores requeridos, se procedió a aplicar los factores de dosificación o consumo de los principales insumos (energía eléctrica, cloro polímero para espesado y/o polímero para desaguado) con base en la masa de lodo generada y las prácticas adecuadas de operación. En el caso de los análisis de laboratorio de agua tratada y lodos, a partir de los requerimientos normativos.

En la Tabla 12 se presentan las consideraciones aplicadas para establecer el consumo de los insumos arriba indicados, así como el costo unitario asignado:

Tabla 12:
Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Energía eléctrica	Caudal medio de agua tratada y concentración promedio de DBO	2.08 kWh/kgDBO	2.50 \$/kWh
Cloro	Caudal medio de agua tratada	5.0 mg/L	20 \$/kg

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Polímero para espesado	Producción de lodo con base en caudal medio y concentración promedio de DBO y SST	4.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Polímero para desaguado	Fracción volátil del 75 % del lodo producido y remoción del 40 % de SSV en digestor	7.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Acarreo lodo desaguado, base húmeda	Lodo desaguado al 20 % de sólidos Masa de lodo en base seca/0.20	Ton de lodo en base húmeda	150 \$/ton
Análisis laboratorio Agua tratada	NOM-001 población > 50 mil habitantes	2 muestreos/mes	8,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Lodo / biosólidos	NOM-004 hasta 1,500 ton/año (base seca);	1 muestreo/año	10,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Control de proceso	---	1 lote por mes	6,000 \$/mes

El costo del mantenimiento preventivo de la PTAR y los consumibles asociados a esa actividad se estimó aplicando el criterio de destinar un importe anual equivalente al 0.85 % del costo de inversión de la planta con sus actuales características. El costo de la planta se estableció a partir de un costo base de 750 mil pesos por litro – segundo de capacidad media instalada.

Para establecer el costo del personal de operación y mantenimiento se considera una plantilla “tipo” de doce personas, misma que se desagrega en las siguientes plazas: 1 Jefe de planta, 2 Supervisores de operación/mantenimiento, 5 operadores y 4 auxiliares de operación o mantenimiento.

Los sueldos considerados para establecer este rubro de costo están en el rango de 28,000 pesos mensuales para el Jefe de planta y de 12,000 pesos por mes para el auxiliar de operación, los sueldos del resto del personal están comprendidos dentro de este rango.

Los sueldos nominales se afectaron por un factor de 1.50 para incorporar el costo de las diversas prestaciones y seguridad social del personal. De esta forma se determinó un costo total mensual de \$ 306, 000 por concepto de personal.

El factor unitario de consumo de energía eléctrica asignado permite establecer, además de la energía consumida por la planta, otros dos indicadores que en la PTAR Gucumatx tienen el siguiente valor:

- + Consumo unitario de energía: 0.47 kWh/m³
- + Potencia media de operación: 636 kilowatts

En la Tabla 13 se presentan los consumos e importes anuales de los rubros de costo establecidos, así como el costo unitario de cada rubro, al dividir su importe anual entre el volumen de agua tratada. Posteriormente, en la Figura 29 se presenta de manera gráfica el costo unitario desagregado por insumo.

Tabla 13:
Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M

Insumo	Consumo anual	Importe anual \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Energía eléctrica	2,228,586	5,571,465	1.18
Cloro	23,652	473,040	0.10
Polímero para espesado	4,499	674,792	0.14
Polímero para desaguado	6,298	944,708	0.20
Acarreo lodo desaguado	3,936	590,443	0.12
Análisis laboratorio		274,000	0.06
Mantenimiento		1,275,000	0.27
Personal de O & M		3,672,000	0.78
Total		13,475,447	2.85

Energía eléctrica consumo anual expresado en kWh; cloro, polímero para espesado y polímero para desaguado, en kg; acarreo de lodo, en toneladas.

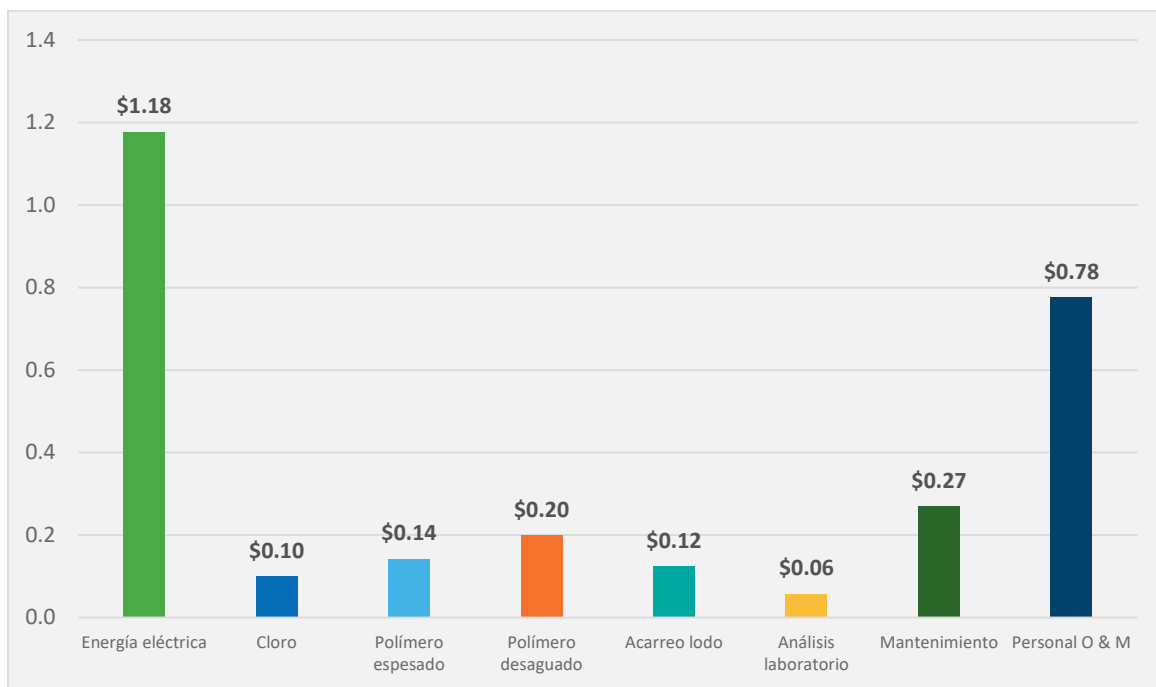


Figura 29 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m³

El importe anual de operación y mantenimiento estimado en esta sección es de 13.48 millones de pesos, con un costo unitario de O & M de 2.85 pesos por metro cúbico de agua tratada.

Al comparar el importe estimado anual de O & M con el importe con importe reportado por FONATUR, de 9.94 millones de pesos, se tiene una excedencia de 3.54 mdp's en el costo estimado con respecto al reportado, que representa un importe adicional del 35.6 %.

No obstante la imprecisión implícita del método para estimar los costos, dados los criterios y premisas generales que se aplican, la diferencia que se obtiene indica que existe una moderada insuficiencia en los recursos económicos y medios materiales que se destinan para la operación y mantenimiento de la PTAR Gukumatz.

Por lo antes expuesto, se considera que el costo de O & M reportado refleja las condiciones de operación y mantenimiento que se observaron en las visitas efectuadas a la planta, así como en la evaluación de la calidad de agua tratada producida; haciendo hincapié en que parte sustancial de la problemática de operación de la planta se debe a la obsolescencia o carencia de equipos.

Observaciones y recomendaciones generales

A continuación se presentan las observaciones y recomendaciones que se desprenden de la evaluación de la información proporcionada por FONATUR y del diagnóstico en campo y gabinete de la PTAR Gucumatz:

1. Por el tamaño de planta se recomienda incorporar pretratamiento de operación automática con capacidad para el caudal máximo horario, que incluya cribado grueso, fino, desarenación, desengrasado, así como prensado de sólidos.
2. Renovar bombas de agua residual cruda con capacidad para el caudal máximo horario.
3. Habilitar tanques sedimentadores primarios como tanques de regulación para control de los picos horarios, con aireación y control de olor.
4. Tanto en el agua cruda como en el agua tratada se reportan valores atípicamente bajos de nitrógeno, se recomienda evaluar este parámetro con otros laboratorios para tener otra referencia.
5. Si bien de acuerdo con la información proporcionada por FONATUR, el agua tratada cumple actualmente con los lineamientos de la NOM-001-2021, se observa tendencia de incremento en la concentración de nitrógeno en el agua de la zona, aunado a que al rehabilitarse el sistema de alcantarillado de la Zona Hotelera se espera que disminuya el ingreso de agua salobre y pluvial que actualmente diluye la concentración de contaminantes, por lo que se recomienda modificar el tipo proceso de los reactores de lodos activados de la 2ª Etapa, que actualmente son aereación extendida, cambiarlo a denitrificación preanóxica.
6. Por el reúso de agua tratada, se recomienda incorporar filtración terciaria.
7. Con la finalidad de reducir el consumo de cloro gas, ya que la PTAR se encuentra dentro de la Zona Hotelera, se recomienda incorporar sistema de desinfección ultravioleta y utilizar el cloro para el agua de reúso y como respaldo de la desinfección UV.
8. Habilitar una caseta de desinfección con cloro de tipo confinado, la de la 1ª Etapa.
9. Se recomienda enviar la purga de lodo secundario a la PTAR El Rey para su estabilización y desaguado, dada la ubicación de la PTAR Gucumatz, el personal de FONATUR reporta que son complicadas las maniobras del retiro de lodo desaguado, aunado a que las condiciones del tren de lodo presentan deterioro por su antigüedad.
 - Puede utilizarse para este fin la línea de impulsión existente entre la PTAR Gucumatz y PTAR El Rey que actualmente se utiliza para enviar agua cruda.



2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Plantas de tratamiento de agua residual de FONATUR

PTAR Gucumatz

El plan de acciones que se propone para la PTAR Gucumatz considera que el caudal medio de diseño se mantiene sin cambio respecto al actual de 200 litros por segundo.

En la Tabla 14 se presenta el resumen de las acciones propuestas para que la planta pueda cumplir con las especificaciones y límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para las descargas a suelo cárstico.

Tabla 14:
Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Gucumatz

Etapa de Tratamiento	Gucumatz
TREN DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	Se incorpora
Regulación agua cruda/pretratada	Se incorpora
Sedimentación primaria	No aplica
Filtro biológico	No aplica

Etapa de Tratamiento	Gucumatz
Biológico remoción DBO	Existente, mejoramiento
Biológico remoción de fósforo	No aplica
Biológico remoción de nitrógeno	Se incorpora
Filtración terciaria	Se incorpora
Desinfección	Cloro gas existente, mejoramiento
TREN DE LODO	
Espesado	No aplica
Digestión aerobia	Se decomisiona, el lodo se envía por bombeo a PTAR El Rey
Digestión anaerobia	No aplica
Desaguado	Se decomisiona

En la Tabla 15 se presenta la descripción y características de las acciones propuestas de rehabilitación, mejoramiento o incorporación de etapas y/o equipos para la PTAR Gucumatz.

Tabla 15:
Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Gucumatz

Etapa de tratamiento	Gucumatz
TREN DE AGUA	
Pretratamiento	1. Incorporar criba de desbaste, con limpieza mecánica 2. Sustituir bombas de agua cruda, con modulación y capacidad suficiente para el pico horario máximo

Etapas de tratamiento	Gucumatz
	- Ampliar capacidad de pretratamiento para manejar caudal pico influente a la PTAR. - Se efectúa todo el pretratamiento en una instalación nueva, actualmente son dos (1ª etapa y Ampliación) - Incorporar equipos de cribado grueso y cribado fino, de operación y limpieza mecánica - Con claro de 15 y 5 milímetros - Incorporar equipos de prensado de sólidos gruesos y finos - Incorporar unidad de desarenación y equipo clasificador de arena Desarenador tipo cámara aereada, con desengrasado
Tratamiento Primario	- Incorporar unidad de regulación de agua pretratada - Para reducir los sobreflujos y derrames de agua cruda hacia cuerpos receptores. - Se aprovechan para este fin los dos sedimentadores primarios existentes - Con aireación para evitar condiciones sépticas
Tratamiento Secundario	- Modificar el tipo proceso de los dos reactores de lodos activados de la Ampliación, actualmente son aireación extendida cambiar a denitrificación preanóxica - La edad de lodos se reduce de > 20 días a 4-5 días, por lo que se tiene volumen en exceso ($\approx 7,000 \text{ m}^3$) para tratar en ambos reactores la totalidad del caudal de agua residual influente - Incorporar sección anóxica en la cabeza de cada reactor ($\approx 25 \%$ del volumen total) - Incorporar recirculación interna de licor mezclado para efectuar la denitrificación, $\approx 150 \%$ del caudal influente - Incorporar agitadores sumergibles - Revisar requerimientos y la potencia de aireación existente - Probablemente sea suficiente la actual, ya que en aireación extendida gobierna la potencia de aireación para mezclado
Clarificación Secundaria	Utilizar los dos clarificadores existentes de la Ampliación

Etapas de tratamiento	Gucumatz
	- Tienen capacidad nominal para caudal medio de 100 L/s, aunque se operan a 75 L/s, por problemas de funcionamiento hidráulico. - Incorporar tercer clarificador secundario con capacidad para un caudal medio de 125 L/s - Se conduce licor mezclado de los dos reactores existentes al nuevo clarificador - El clarificador se construye en el área actualmente ocupada por el reactor de lodos activados de la 1ª etapa.
Tratamiento Terciario	- Incorporar filtración terciaria - Tipo tambor parcialmente sumergido, o de marco fijo, con claro de malla < 20 micras
Desinfección	- Incorporar sistema de desinfección ultravioleta - Para desinfección del agua tratada a infiltración - Habilitar una caseta de desinfección con cloro de tipo confinado, la de la 1ª Etapa - Actualmente son dos casetas: la de 1ª etapa y la de Ampliación - Para desinfección del agua para reúso (50 % del caudal) - Como respaldo del sistema UV
TREN DE LODO	Los lodos generados se enviarán a la PTAR El Rey
Espesamiento de lodos	No aplica
Digestión de lodos	- No aplica - Se utiliza el tanque existente como tanque de almacenamiento de purga de lodo - Se habilita sistema de bombeo del tanque de almacenamiento de purga de lodo, - Se conecta con la línea de impulsión existente entre PTAR Guicumat y PTAR El Rey

Etapa de tratamiento	Gucumatz
Desaguado de lodos	1. No aplica • Se mantienen en condiciones operativas el edificio y equipos existentes,
Secado adicional de lodo desaguado	1. No aplica
TEMAS VARIOS	1. Con medición de flujo en las corrientes de agua y lodo: agua cruda, agua tratada; recirculación y purga de lodos, otros. 2. Sensores para control de proceso, enfocados a la eficiencia energética, ahorro de reactivos y control de la calidad del agua tratada: TBD. 3. Arrancadores suaves y variadores de frecuencia para los principales equipos: bombas de agua cruda, de recirculación de lodo, de purga de lodo; sopladores.

En la Figura 30 se presenta el diagrama de flujo del tren de tratamiento de agua y de lodos de la PTAR Gucumatz incorporando las acciones propuestas para que la planta produzca agua tratada que cumpla con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas a suelo cársico.

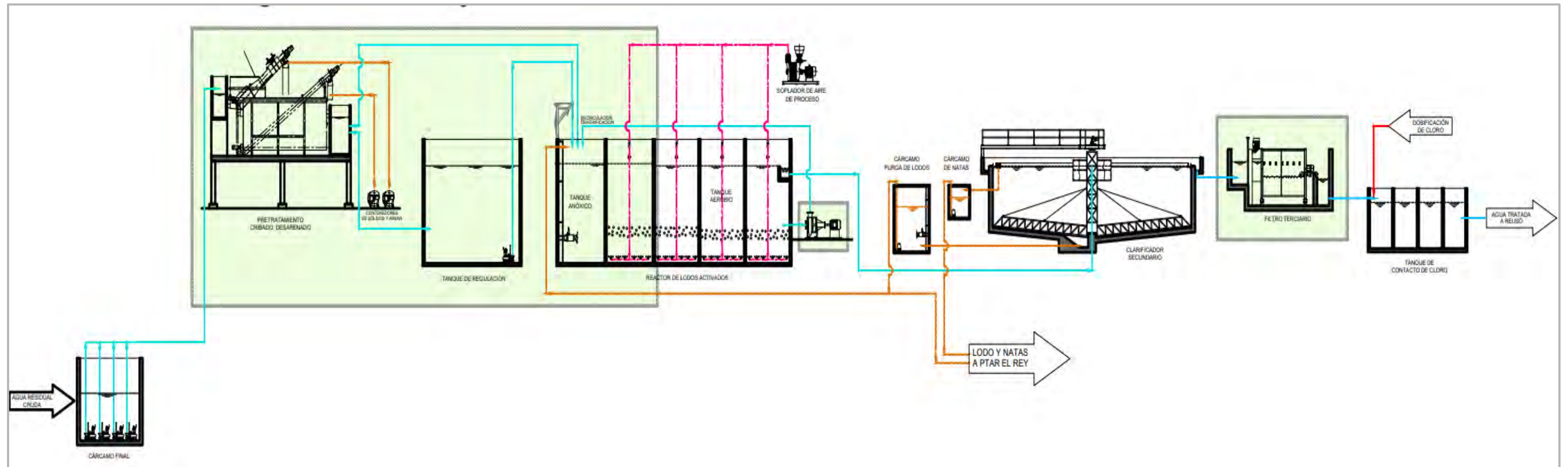


Figura 30 Diagrama de flujo de la PTAR Gucumatz con las acciones propuestas



3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el procedimiento realizado para la estimación de costos de las acciones necesarias por ejecutar para que la PTAR Gucumatz cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; en dicho presupuesto se incluye el costo de obra civil, electromecánica, eléctrica, instrumentación y control para obra nueva o ampliaciones, rehabilitación de obras existentes y proyecto ejecutivo y supervisión de obra y proyecto ejecutivo.

Las acciones de mejora surgen de la visita y diagnóstico técnico que se presenta previamente, así como de las entrevistas e información recabada con las áreas responsables de la operación y gestión de los recursos para saneamiento.

Techo financiero

El techo financiero para la implementación de las acciones de mejora y rehabilitación de la PTAR, se realizó a partir de costos paramétricos, como lo indican los Términos de Referencia.

Para lo anterior se recurrió a costos base de unidades de proceso y equipamiento similares y de capacidad comparable con las necesidades de las PTAR que forman parte de este estudio, de igual manera dichos costos son ajustados de acuerdo a la capacidad necesaria.

En la Tabla 16 se muestran los costos base por unidad de proceso, los cuales corresponden al costo de mercado establecido en proyectos realizados en el año 2021 y 2022 en Quintana Roo, en plantas de tratamiento con proceso de remoción biológica de nitrógeno y fósforo, así como equipamiento electromecánico y de proceso, tanto de tipo convencional como relativamente nuevo en la región, como es la filtración terciaria y la desinfección con lámparas ultravioleta.

Tabla 16:
Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio

Unidad de proceso	Costo base en MDP
TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	20.97
Regulación agua cruda/pretratada	12.65
Sedimentación primaria	13.12
Caja distribuidora agua primaria	0.99
Filtro biológico	
Biológico remoción DBO	22.99
Biológico remoción de fósforo	2.50
Biológico remoción nitrógeno	5.75
Clarificación secundaria	14.80
Recirculación y purga de lodo	6.89
Filtración terciaria	12.12
Desinfección	10.49
Pozo de infiltración	1.60
TREN DE TRATAMIENTO DE LODOS	
Espesado de lodo	7.79
Digestión aerobia	16.09
Digestión anaerobia	59.55
Tanque de lodo digerido	3.77
Desaguado de lodo	17.43
Cogeneración	18.81

Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con las acciones a realizar en la PTAR se estimaron los costos de inversión, esto de acuerdo con los costos base y el factor de ajuste, los cuales están relacionado con el caudal de tratamiento.

A continuación se describe el procedimiento aplicado a cada planta de tratamiento (identificada como PTAR "n") para establecer el techo financiero preliminar de los recursos económicos requeridos para implementar el plan de acciones:

1. Los costos de referencia de las unidades de proceso se ajustaron a valores de noviembre de 2022 con el factor de actualización que resulta de dividir el INPC de noviembre entre el INPC del mes en que se originó el presupuesto.

A manera de ejemplo, a continuación se describe el procedimiento:

- Fecha del presupuesto de la unidad de proceso o PTAR de referencia: octubre de 2021.
- Valor del INPC en octubre de 2021: 115.561
- Valor del INPC de noviembre de 2022: 125.997
- Factor de actualización costo de referencia: $125.997/115.561 = 1.090$

2. El costo de referencia del proceso de digestión anaerobia y del sistema de cogeneración se determina con base en un digestor anaerobio con sistemas periféricos; tamizado de lodo, tratamiento lateral de la corriente de desaguado de lodo anaerobio; antorcha de quemado de biogás, gasómetro para almacenar el biogás generado, acondicionamiento de biogás; caseta de equipos de digestión y sistema de cogeneración.

En la siguiente tabla se presenta el desglose y capacidad de los componentes de las etapas de digestión anaerobia de lodos y del sistema de cogeneración:

Etapa de Digestión Anaerobia de Lodo

Concepto	Importe actualizado, mdp
Tamizado de lodo (capacidad para 5 L/s de lodo espesado al 5%)	1.22
Digestor anaerobio mesofílico (de 5,700 m ³)	43.25
Gasómetro de membrana y periféricos (de 1,000 m ³)	6.14
Quemador de biogás y periféricos (capacidad para 225 m ³ /h)	1.59

Concepto	Importe actualizado, mdp
Edificios operativos	2.71
Tratamiento lateral del agua retirada en desaguado de lodo	4.64
Subtotal	59.55
Obra eléctrica (12 % del subtotal)	7.44
Control (3 % del subtotal + obra eléctrica)	2.01
Contingencias (8 % del subtotal + obra eléctrica + control)	5.52
Total	74.53

Sistema de Cogeneración

Concepto	Importe actualizado, mdp
Sistema de tratamiento de biogás (capacidad para 225 m ³ /h) para remoción de humedad, impurezas y H ₂ S	7.10
Sistema integral de cogeneración (capacidad de 500 kW eléctricos)	11.72
Total	18.81

El costo actualizado de las unidades de proceso se ajustó posteriormente en función de la capacidad (a caudal medio) de las unidades de proceso de la PTAR "n", en relación con la capacidad de la PTAR de referencia, acorde a lo siguiente:

$$\text{Costo PTAR "n"} = \text{Costo PTAR de referencia} * ((\text{Tamaño PTAR "n"} / \text{Tamaño PTAR referencia})^{0.70})$$

La capacidad de la PTAR de referencia es para un caudal promedio de 150 L/s.

A manera de ejemplo, al utilizar la ecuación anterior, y considerando que la PTAR "n" es de 350 L/s de capacidad, se obtiene un multiplicador de 1.81, mismo que se aplica sobre el importe de las unidades de proceso de la PTAR de referencia.

De esta forma, en lugar de ajustar el costo de la PTAR "n" con una relación lineal entre el tamaño de ambas plantas (2.33), el criterio toma en cuenta que el costo unitario de inversión (\$ por L/s de capacidad) disminuye al aumentar el tamaño de la unidad de proceso y/o de la PTAR.

Este procedimiento de ajuste de costo se utilizó en las unidades de proceso cuyo dimensionamiento está determinado por la capacidad y carga hidráulica, como es el caso de las etapas que a continuación se indican:

- Pretratamiento (cribado y desarenación)
- Regulación y/o bombeo de agua cruda/pretratada
- Sedimentación primaria
- Caja distribuidora agua primaria
- Clarificación secundaria
- Recirculación y purga de lodo
- Filtración terciaria
- Desinfección
- Tanque de lodo digerido

Asimismo, el procedimiento de ajuste de costo descrito en este numeral también es aplicable en los procesos biológicos de tratamiento de agua y en las operaciones y procesos del tren de tratamiento de lodos, cuando en la PTAR "n" se presenta la condición de carga influente orgánica y de sólidos que se describe en el siguiente numeral.

3. El factor de ponderación arriba referido se utiliza de manera directa si la carga contaminante influente a la PTAR "n", expresada como la concentración promedio de la DBO y SST en el agua residual cruda, es comparable a la de ($\leq 20\%$) la PTAR de referencia.

La concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente a la PTAR de referencia es 350 mg/L.

Se considera que el agua residual influente a la PTAR "n" es comparable al agua residual de la PTAR de referencia, cuando la concentración promedio de DBO y SST está en el rango de $\pm 20\%$ a la concentración indicada en el párrafo previo.

4. A continuación se enlistan las operaciones y procesos del tren de tratamiento de agua y de lodos que, en caso de variación mayor al 20 % en la concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente, estarían sujetos a ajuste de costo adicional al ya aplicado en el numeral 3.
 - Filtro rociador
 - Reactor de lodos activados, remoción DBO
 - Reactor de lodos activados, remoción de fosforo
 - Reactor de lodos activados, remoción nitrógeno
 - Espesado de lodo
 - Digestión aerobia
 - Digestión anaerobia
 - Desaguado de lodo

En los casos en que la calidad del agua residual influente a la PTAR "n" tiene una variación superior al 20%, hacia arriba o hacia abajo, se procedió a aplicar un ajuste adicional al costo de inversión en las operaciones y procesos del listado inmediato previo.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual influente es $\approx 30\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.05 o 0.90, según corresponda.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual es $\approx 40\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.12 o 0.80, según corresponda.

5. Se aplicó un factor de ponderación para los casos en que la actividad propuesta no es una unidad de proceso nueva y completa, es decir que consiste en la rehabilitación, mejoramiento o complemento de capacidad de una etapa de proceso o unidad existente.

El valor del factor de ponderación asignado en estos casos está en el rango de 0.35 a 0.65, a criterio del especialista, en función del grado de intervención que se requiere para la unidad de proceso en cuestión.

En términos generales, los valores cercanos al límite inferior del rango se aplicaron cuando la acción implicaba rehabilitación civil única o principalmente; los valores cercanos al límite superior se aplicaron cuando la intervención implica también reequipamiento electromecánico.

6. Una vez establecido el importe de inversión por planta de las principales unidades del tren de tratamiento de agua y de lodos, para determinar el importe de otros componentes de la PTAR a dicho importe se aplicó un valor seleccionado de los rangos de porcentaje que a continuación se indican:

Equipo menor:	5 % a 8 %
Vialidades, patios y obras exteriores:	1 % a 5 %
Obra eléctrica:	10 % a 15 %
Automatización y control:	3 % a 5 %
Imprevistos y contingencias:	8 % a 12 %

7. El importe por elaboración del proyecto ejecutivo de las acciones propuestas por planta se determinó a partir de un porcentaje, en el rango del 1.2 % al 3.5 %, mismo que se aplicó sobre el importe total estimado.

8. El costo de la supervisión de la ejecución y puesta en marcha de las obras y equipamiento propuestas en el Plan de Acciones por planta, se estableció aplicando un porcentaje del 3.5 % sobre el importe total estimado, sin incluir los importes correspondientes al costo del proyecto ejecutivo y de capacitación.

Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares

La selección de la digestión anaerobia como proceso de tratamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, orientado a la generación de biogás para su aprovechamiento, o bien la opción de instalar paneles solares en estas plantas, ha sido justificada mediante criterios técnicos específicos. Estos criterios incluyen la capacidad operativa de las plantas, la disponibilidad de espacio físico y las propiedades de la carga orgánica influente. En particular, en el caso de las PTAR ubicadas en el Estado de Quintana Roo, el contexto local en que se encuentra cada planta cobra especial relevancia, dado que las condiciones geográficas, ambientales y de infraestructura turística pueden influir en la viabilidad y eficiencia de cada tecnología implementada.

Este análisis permite una decisión fundamentada, buscando optimizar tanto el rendimiento energético como el aprovechamiento sostenible de los recursos locales.

Antecedentes

Como parte del diagnóstico para el mejoramiento de las PTAR de Quintana Roo mayores a 100 L/s, la digestión anaerobia se considera en las siguientes PTAR:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur que recibe también los lodos de la PTAR Caribe
4. PTAR Saas Tun Ha (a futuro, mediano plazo)

Adicionalmente, la instalación de paneles solares se considera en las siguientes PTAR, de las cuales las primeras tres son instalaciones existentes:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur
4. PTAR El Rey
5. PTAR Saas Tun Ha
6. PTAR San Miguelito
7. PTAR Bicentenario
8. PTAR Centenario

Digestión Anaerobia y Cogeneración

La digestión anaerobia es un proceso biológico mediante el cual los lodos residuales se descomponen en ausencia de oxígeno, generando biogás. El biogás, compuesto principalmente de metano, puede ser aprovechado para producir electricidad y calor mediante sistemas de cogeneración. Además de reducir el volumen de lodos, la digestión anaerobia permite un manejo más eficiente de los residuos, mejorando la sostenibilidad de las plantas al aprovechar el potencial energético del metano.

Los principales aspectos considerados para proponer digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás en las PTAR se presentan en seguida. Todos fueron considerados en conjunto para cada planta.

Condiciones climáticas

La temperatura está relacionada con la velocidad de las reacciones químicas. En el diseño de la digestión anaerobia, la temperatura aumenta la velocidad de hidrólisis y de formación de metano, además disminuye el mínimo tiempo de retención requerido para llegar a una destrucción de sólidos aceptable (38 % en SSV).

Para un proceso mesofílico, que es el seleccionado para las PTAR de Quintana Roo, las temperaturas óptimas se encuentran entre los 30 y 38°C (Metcalf & Eddy, 2014), lo cual es fácilmente alcanzado en la región, con temperaturas de agua residual alrededor de los 30°C todo el año. El no requerir un sistema para control fino de la temperatura es una gran ventaja de toda la zona.

Carga orgánica influente

Se requiere mantener cierta carga orgánica para mantener el equilibrio entre los microorganismos que realizan la digestión anaerobia y mantener una producción de biogás constante. La carga orgánica alimentada al digestor proviene de la fracción de SSV en los lodos generados en el proceso primario y/o secundario y éstos a su vez dependen de las características del agua residual.

En general, la carga orgánica influente necesaria proviene de un análisis detallado del proceso para cada caso, sin embargo, existen lineamientos con reglas generales para anticipar este resultado. En el caso de las PTAR de Quintana Roo, se consideraron para digestión anaerobia las PTAR que en su operación actual o a capacidad plena, recibieran más de 300 L/s o carga orgánica igual o mayor a 7.5 ton DBO/d, esto de acuerdo con estudios técnicos realizados previamente por GIZ (GIZ México, 2017).

Toxicidad

La digestión anaerobia es un proceso sensible a variaciones de pH y puede verse afectada por la presencia de ciertas sustancias inhibitoras en las aguas residuales. Para la instalación de

una nueva PTAR, es fundamental realizar análisis previos para descartar la presencia de estos compuestos que puedan interferir en el proceso. En el presente caso, dado que las PTAR evaluadas ya están en operación, se ha verificado que en los sitios propuestos para la digestión anaerobia no se han registrado historiales de inhibiciones significativas al proceso biológico, lo que garantiza su viabilidad.

Volumen y tipo de lodos generados

Una de las principales ventajas de la digestión anaerobia es la generación de biogás, siendo más eficiente esta generación cuanto mayor es la carga orgánica en los sólidos alimentados. En los sitios propuestos, además de lodos secundarios, se procesan lodos primarios con alto contenido de SSV, lo que incrementa la generación de biogás. Las altas cargas orgánicas influentes a las plantas aseguran buena generación de sólidos, maximizando la eficiencia del sistema de digestión.

Disponibilidad de espacio

Los sitios con propuesta de digestión anaerobia fueron revisados para la disponibilidad de espacio para una unidad de digestión anaerobia junto con gasómetro e instalaciones de cogeneración y manejo de biogás.

Disponibilidad operativa

La digestión anaerobia es una unidad significativamente más compleja que las demás en el tren de tratamiento, lo que demanda mayor capacidad técnica y un personal operativo especializado para su correcta operación a lo largo de la vida útil de la PTAR. En las plantas propuestas, se considera que cuentan con el personal y la capacidad técnica necesarios para implementar y mantener este proceso de manera eficiente.

Viabilidad operativa

Con base en la calidad de agua, la temperatura, el caudal influente y el tipo de proceso, es posible estimar la cantidad de lodos producidos en cada PTAR. Los lodos producidos son la base para estimar el tamaño ideal del digester anaerobio. De acuerdo con la literatura (Metcalf & Eddy, 2014) el tiempo de retención recomendado para los lodos a 30°C es de 6 a 14 días y la carga orgánica puede variar entre los 1.6 y 4.8 kg SSV/m³ d.

A manera de ejemplo, con el volumen de 5,700 m³/d y a una carga de 2.4 kg SSV/ m³ d sería posible alimentar hasta 13.7 toneladas al día de lodo. Este flujo másico a una concentración de 3.5 % en sólidos tendría un tiempo de residencia de 14.6 días. La producción de lodo actual de las PTAR seleccionadas para digestión anaerobia varía entre 6.7 y 9.9 toneladas al día, y puede ser aún mayor de acuerdo con la capacidad de tratamiento de agua residual instalada. El volumen seleccionado considera este crecimiento además de las necesidades actuales.

Conclusiones para biogás y cogeneración

Los aspectos anteriores se analizaron y forman parte del análisis de costo presentado. En general en las PTAR seleccionadas es positiva la presencia de la digestión anaerobia. En resumen, para seleccionar las PTAR donde es viable instalar digestión anaerobia se consideró que:

1. La temperatura de la zona es favorable con 30°C.
2. La carga orgánica influente a las PTAR y/o el caudal se encuentran en el umbral de 7.5 ton/d de DBO o 300 L/s de caudal tratado.
3. Los procesos biológicos existentes no presentan obstáculos por sustancias inhibidoras.
4. La presencia de lodo primario favorece la producción de biogás.
5. Existe suficiente espacio para la instalación de las unidades respectivas.
6. Existe suficiente personal operativo y capacidad técnica para mantener la unidad funcionando eficientemente.
7. El volumen seleccionado como base para los costos cubre los rangos de operación actuales y futuros de cada PTAR.
8. En el balance económico, la producción y aprovechamiento del biogás es un instrumento importante para hacer viable la operación de las PTAR más grandes.

Generación de Energía Solar

A diferencia de la digestión anaerobia, la instalación de paneles solares es un proceso más sencillo y viable para prácticamente cualquier PTAR. El criterio principal para su implementación fue la disponibilidad de espacio en la planta y su tamaño, siendo seleccionadas aquellas de mediana o gran escala.

Las plantas que no tienen suficiente carga orgánica para justificar la digestión anaerobia, pero disponen de amplias áreas, pueden aprovechar los paneles solares para reducir su dependencia de la red eléctrica y generar energía renovable de manera sostenible. En consecuencia, esta tecnología se considera para casi todas las PTAR.

El costo de implementación de ambas tecnologías no es equivalente, siendo la digestión anaerobia considerablemente más costosa. Sin embargo, como se muestra en el análisis económico, la generación de biogás a escalas superiores al umbral establecido por la GIZ produce una cantidad significativa de energía eléctrica, generando importantes ahorros a largo plazo. Además, la digestión anaerobia requiere una mayor capacidad técnica para su operación. En contraste, los paneles solares, más sencillos de instalar y mantener, representan una opción accesible y conveniente para todas las PTAR.

A continuación se presenta una tabla resumen con los principales criterios utilizados para la selección de digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás, así como para la instalación de paneles solares.

			Principales Criterios para selección de Digestión Anaerobia					Criterio de selección para la instalación de Paneles Solares	
Nombre de la planta	Capacidad instalada (L/s)	DBO entrada (mg/L)	Carga orgánica influente (Ton DBO /día)	Carga orgánica > 7.5 ton / día	Sedimentación primaria (Lodo primario)	Disponibilidad operativa	Digestión Anaerobia	Espacio disponible	Paneles solares
Gucumatz	200	130	2.2	NO	NO	SI	NO	NO	NO

Resumen de inversión, techo financiero

En la Tabla 17 se muestra el monto de inversión por unidad de proceso o componente de proyecto, y en la Figura 31 se muestra su distribución porcentual.

Tabla 17:
Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Etapa o componente	Importe PTAR Gucumatz, mdp's
Proyecto ejecutivo	1.50
Bombeo / regulación / pretratamiento / primario	23.37
Remoción DBO y nutrientes, desinfección	19.94
Tratamiento terciario	14.82
Tren de tratamiento de lodos	4.26
Digestión anaerobia	
Cogeneración	
Paneles solares	
Equipo menor	3.12
Terracerías, vialidades, patios	2.50
Obra eléctrica	7.49
Automatización y control	1.87
Imprevistos y contingencias	4.99
Supervisión	2.90

Etapa o componente	Importe PTAR Gucumat, mdp's
Capacitación	0.40
Total	87.16

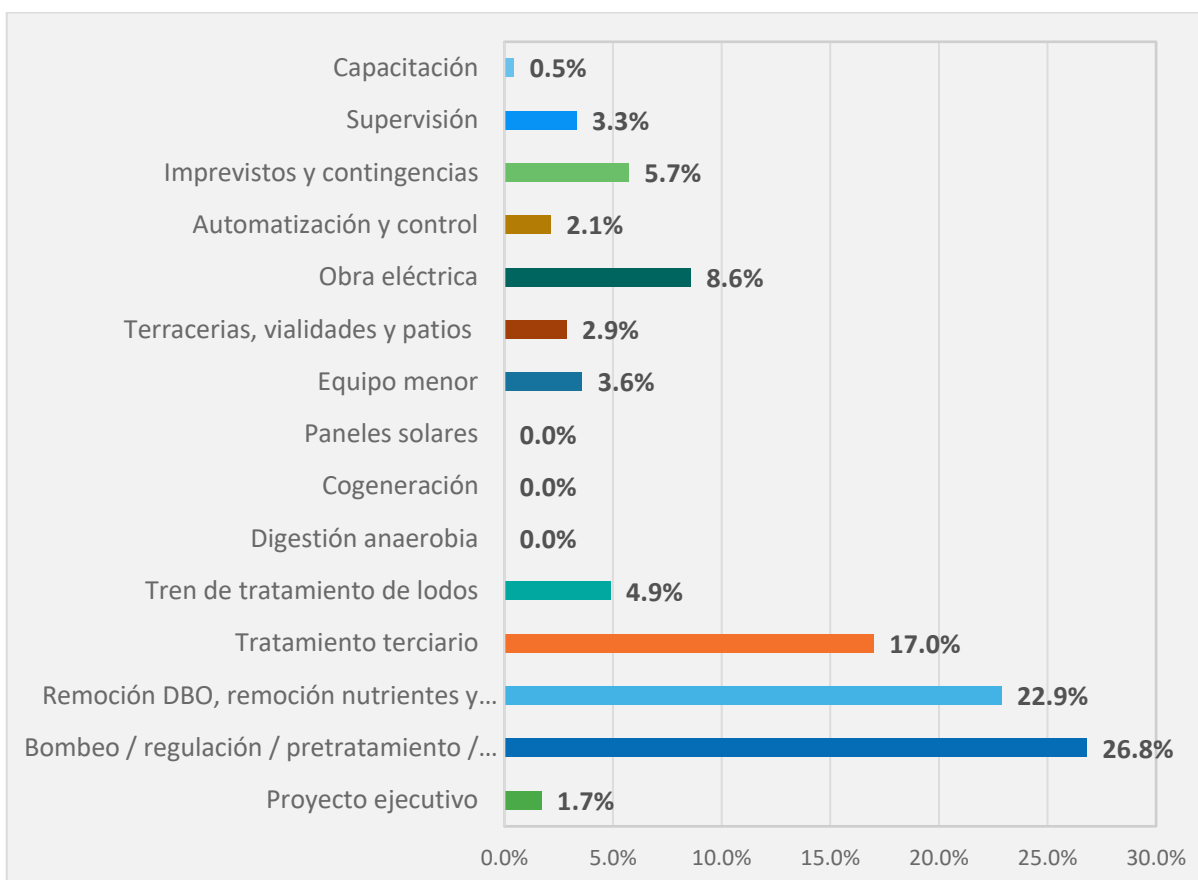


Figura 31 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

En la Tabla 18 se muestra el resumen del techo financiero total.

Tabla 18:
Monto de inversión, millones de pesos

PTAR	Capacidad instalada, L/s	Capacidad propuesta, L/s	Inversión requerida	Inversión Digestión Anaerobia	Inversión Cogeneración	Inversión Paneles solares	Inversión Total	Inversión unitaria, k\$/lps
Gucumatz	200	200	87.2				87.2	436

A continuación, se muestra la estimación detallada de costos, se describe la unidad de proceso, el factor de ajuste integrado y monto de inversión estimado, así como los porcentajes aplicados a las obras complementarias: vialidades, obra eléctrica, de control e instrumentación, imprevistos, proyecto ejecutivo, supervisión y capacitación.

Tabla 19:
Estimación detallada de costos PTAR Guccumatz

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tren de Tratamiento de Agua		
Pretratamiento mecánico	0.86	17.95
Regulación agua cruda/pretratada	0.43	5.42
Sedimentación primaria		
Caja distribuidora agua primaria		
Filtro biológico		
Biológico remoción DBO	0.10	2.25
Biológica remoción de fósforo		
Biológico remoción nitrógeno	0.61	3.51
Clarificación secundaria	0.10	1.45
Recirculación y purga de lodo	0.92	6.32
Filtración terciaria	1.22	14.82
Desinfección	0.61	6.41
Pozos de infiltración		
Tren de Tratamiento de Lodos		
Espesado		
Digestión aerobia		
Digestión anaerobia		
Tanque de lodo digerido		

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Desagüado	0.24	4.26
Cogeneración		
Subtotal		62.39
Equipo menor	5.0%	3.12
Terracerías, vialidades y patios	4.0%	2.50
Obra eléctrica	12.0%	7.49
Automatización y control	3.0%	1.87
Imprevistos y contingencias	8.0%	4.99
Proyecto ejecutivo		1.50
Supervisión		2.90
Capacitación		0.40
Total		87.16



4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el programa de inversiones necesarias por ejecutar para que la PTAR cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; el programa abarca del año 2023 al año 2027.

Este programa de inversiones es el resultado de las acciones propuestas para mejorar la calidad del agua tratada de las PTAR's con capacidad de tratamiento igual o mayor a 100 l/s en el estado de Quintana Roo, así como el presupuesto derivado del plan de acciones. La programación de las inversiones se basa en las necesidades propias de cada planta considerando el objetivo principal, que es el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

El 5 de diciembre de 2022 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación los:

LINEAMIENTOS que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Los Lineamientos constan en total de veintitrés artículos, más un artículo transitorio, así como el denominado Anexo A: Instructivo para la Información Requerida en el Sistema.

Los Lineamientos están estructurados en seis capítulos:

- + Capítulo Primero, Disposiciones Generales
- + Capítulo Segundo, Requisitos para la Presentación y Registro de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Tercero, De los Plazos de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Cuarto, Procedimiento para la presentación, registro y revisión de los Programas para el Cumplimiento, así como del Informe de Avances
- + Capítulo Quinto, De las Verificaciones
- + Capítulo Sexto, De las Sanciones

Aspectos Clave de los Lineamientos

Artículo 2. Sujeto Regulado: El responsable de descargas de aguas residuales al que resulte aplicable la NOM-001-SEMARNAT-2021, quien podrá presentar sus Programas para el Cumplimiento ante la Comisión.

Artículo 5. La presentación del Programa para el Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, **es de naturaleza voluntaria**, por lo que, en caso de su incumplimiento, el responsable de la descarga de aguas residuales en cualquier cuerpo receptor propiedad de la nación, quedará sujeto a los plazos establecidos en la mencionada Norma Oficial Mexicana

Artículo 6. El Sujeto Regulado presentará su Programa para el Cumplimiento, en los siguientes supuestos:

a) Cuando **deba modificar sus instalaciones** con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como el Apéndice Normativo de la NOM-001-SEMARNAT-2021, y que los ajustes y acciones que se deban ejecutar de acuerdo a los estudios realizados por dicho Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor, en el Artículo 2o Transitorio de la NOM, o bien,

b) Que el Sujeto Regulado **deba modificar los procesos productivos de las actividades que generan la descarga de aguas residuales**, con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como al Apéndice Normativo y que dichas modificaciones, de acuerdo con los análisis o la evidencia del Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor.

Artículo 7. El Sujeto Regulado, en caso de presentar el Programa para el Cumplimiento lo hará por cada uno de los puntos autorizados en su Permiso de Descarga, y que, para cumplir con

las disposiciones establecidas en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se ubiquen en alguno de los supuestos establecidos en el Artículo 6 de los Lineamientos.

Artículo 8. Una vez registrado el Programa para el Cumplimiento, y en tanto este se encuentre vigente, en concordancia con el Artículo 5º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, el Sujeto Regulado deberá cumplir, además de lo comprometido en el Programa, con los límites y parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, para gozar de los beneficios e incentivos que para tales efectos establezca la LFD vigente.

Artículo 10. El Programa para el Cumplimiento, contendrá:

- + Nombre, denominación o razón social del Sujeto Regulado;
- + RFC del Sujeto Regulado;
- + Datos de identificación del Permiso de Descarga; Volumen de descarga; Datos del medidor o dispositivo de medición de las aguas residuales descargadas; Coordenadas del punto de descarga;
- + Datos generales del representante legal; Correo electrónico;
- + Justificación de la solicitud para la aplicación del Programa para el Cumplimiento;
- + Cronograma de actividades para las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento; Periodo solicitado;
- + E-Firma del Sujeto Regulado o representante legal.

Artículo 12. Los Programas para el Cumplimiento deberán presentarse ante la CONAGUA, por el Sujeto Regulado **a partir de que entre en vigor la NOM-001-SEMARNAT-2021 y hasta el 3 de abril del 2023.**

El Sujeto Regulado que no presente su Programa para el Cumplimiento en el periodo señalado, se sujetará a los plazos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 13. Los plazos que se establezcan en el Cronograma de Actividades para el seguimiento de las acciones comprometidas en los Programas para el Cumplimiento **no deberán rebasar el 11 de marzo de 2027.**

Artículo 15. La CONAGUA realizará revisiones aleatorias a los Programas para el Cumplimiento, podrá solicitar al Sujeto Regulado, las aclaraciones o información adicional que considere necesarias. En el supuesto de que el Sujeto Regulado no atienda el requerimiento de información dentro de los veinte días hábiles siguientes, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y será aplicable lo establecido en el Artículo 2º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 16. Una vez registrado el Programa ante la CONAGUA, no será objeto de modificación, salvo en el caso que el Sujeto Regulado justifique la necesidad de realizar algún cambio y no exceda el plazo originalmente establecido.

Artículo 17. El Sujeto Regulado debe presentar **dentro de los primeros cinco días hábiles de los meses de marzo y septiembre de cada año**, a partir de la fecha del registro, el avance de actividades mediante la carga de información que solicite el Sistema de Gestión en el apartado correspondiente al Informe de Avance del Programa para el Cumplimiento. Cuando el Sujeto Regulado no envíe en tiempo y forma la información del Informe de Avance, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y se aplicarán las disposiciones de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 21. La CONAGUA procederá a cancelar el Programa para el Cumplimiento y su registro, cuando compruebe que el Sujeto Regulado no ha cumplido con lo comprometido en el programa registrado. La CONAGUA, procederá a notificar la cancelación del Programa, por lo que quedarán sin efectos las acciones de cumplimiento propuestas por el Sujeto Regulado en su respectivo Programa, aplicándose las disposiciones correspondientes de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 22. Cuando las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento presentado impliquen la suspensión de sus procesos productivos y actividades para llevar a cabo las acciones tendientes a la conversión de procesos productivos o la instalación de maquinaria, equipos o plantas que se requieran para el cumplimiento de los parámetros y límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, y deba quedar fuera de operación el sistema de tratamiento de aguas residuales, el Sujeto Regulado deberá dar aviso a la CONAGUA, al menos 30 días hábiles antes de que esto ocurra, e indicar el periodo por el que prevalecerá dicha situación, el cual **no deberá exceder de tres meses**, y podrá presentarse **hasta un máximo de dos ocasiones** durante la vigencia del Programa.

De llevar a cabo la suspensión de sus procesos de tratamiento de aguas residuales sin el aviso correspondiente se aplicarán las sanciones previstas. Una vez recibida la solicitud, el Sistema de Gestión emitirá el comprobante que acreditará que la solicitud fue hecha en tiempo y forma.

Artículo 23. En caso de incumplimiento a los compromisos establecidos en el Programa para el Cumplimiento, quedan sin efecto las prerrogativas que ampara dicho documento, por lo cual el Sujeto Regulado será acreedor a las sanciones que correspondan y, en su caso, estará obligado a efectuar el pago de los derechos por el uso y aprovechamiento de cuerpos receptores de descargas de aguas residuales propiedad de la nación, a partir de la fecha del incumplimiento, así como de aquéllos que se hubieren generado con anterioridad, con sus accesorios, conforme a la LFD vigente.

Programa de inversión anual

Como se mencionó anteriormente, el monto de inversión total del Plan de Acciones es de **87.16 millones de pesos (mdp)**, inversión a realizarse en 5 años a partir del año 2023 hasta marzo del 2027, acorde al plazo previsto en los Lineamiento que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el presente apartado se muestra el desglose anual del Plan de Acciones, donde se describe el monto de inversión por año y unidad de proceso y/o componente del proyecto programado, así como los importes anuales y acumulados y su porcentaje de participación en la inversión.

Tabla 20:
Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
A	Proyecto ejecutivo	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50
		100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
B	Cárcamo, regulación, pretratamiento, y/o tratamiento primario	0.00	11.68	11.68	0.00	0.00	23.37
		0.0%	50.0%	50.0%	0.0%	0.0%	100.0%
C	Tren de tratamiento de agua	12.96	6.98	0.00	0.00	0.00	19.94
		65.0%	35.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
D	Tratamiento terciario	0.00	0.00	0.00	14.82	0.00	14.82
		0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	100.0%
E	Tren de tratamiento de lodos	0.00	0.00	4.26	0.00	0.00	4.26
		0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	100.0%
F	Cogeneración (y/o paneles solares)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
G	Equipo menor	0.71	0.91	0.78	0.72	0.00	3.12
		22.6%	29.2%	25.0%	23.2%	0.0%	100.0%
H	Terracerías, vialidades y patios	0.56	0.73	0.62	0.58	0.00	2.50
		22.6%	29.2%	25.0%	23.2%	0.0%	100.0%
I	Obra eléctrica	1.69	2.19	1.87	1.74	0.00	7.49
		22.6%	29.2%	25.0%	23.2%	0.0%	100.0%
J	Automatización	0.42	0.55	0.47	0.43	0.00	1.87
		22.6%	29.2%	25.0%	23.2%	0.0%	100.0%
K	Imprevistos y contingencias	1.13	1.46	1.25	1.16	0.00	4.99
		22.6%	29.2%	25.0%	23.2%	0.0%	100.0%
L	Supervisión	0.66	0.85	0.72	0.67	0.00	2.90
		22.6%	29.2%	25.0%	23.2%	0.0%	100.0%
M	Capacitación	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.40
		0.0%	50.0%	50.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	Total Anual y Gran total, mdp's	19.64	25.54	21.85	20.12	0.00	87.16
	Acumulado anual, mdp's	19.64	45.18	67.03	87.16	87.16	
	Total Anual y Gran total, %	22.5%	29.3%	25.1%	23.1%	0.0%	100%
	Acumulado anual, %	22.5%	51.8%	76.9%	100.0%	100.0%	

A continuación se muestra de manera gráfica el monto de inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR:

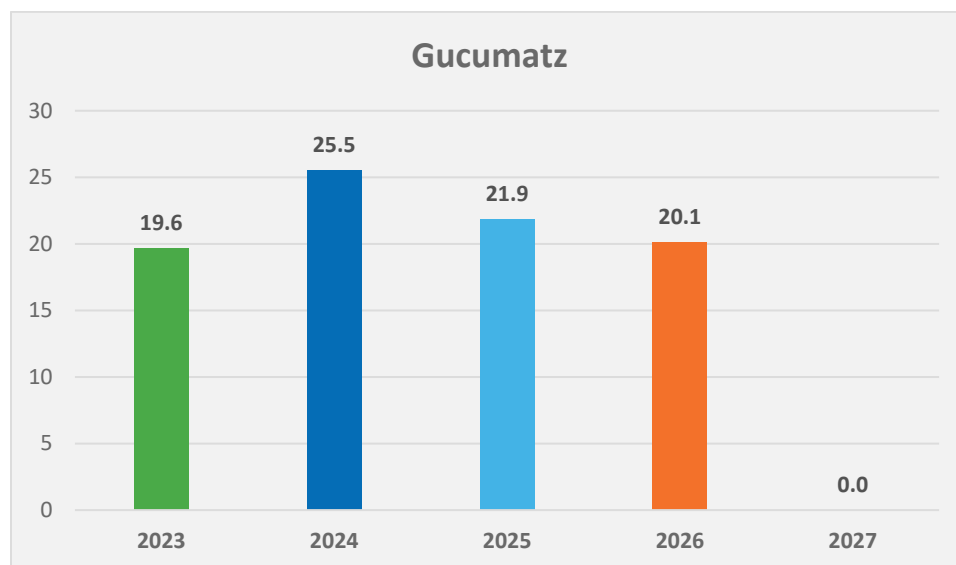


Figura 32 Inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR

Referencias

CONAGUA. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. . México: CONAGUA.

GIZ, C. A. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Mexico: GIZ.

Metcalf & Eddy / AECOM. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. NY: McGraw-Hill.

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4a ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.

US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Norponiente

Contenido

PTAR Norponiente I	1
Contenido	4
Índice de Tablas	5
Índice de Figuras.....	6
1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más	8
Descripción general de la PTAR Norponiente I	8
Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases	9
Descripción general del proceso	10
Diagrama de flujo de proceso	12
Descripción de las unidades de proceso	13
Tren de Tratamiento de Agua	13
Tren de Tratamiento de Lodo.....	21
Estado de conservación y operación de las instalaciones.....	26
Análisis de calidad del agua cruda.....	28
Calidad de agua cruda, histórica	28
Calidad de agua cruda, de este Estudio	29
Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada.....	32
Calidad de agua tratada, histórica.....	32
Calidad de agua tratada, de este Estudio.....	34
Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua	37

Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR	38
Costos reales de operación y mantenimiento (O & M).....	39
Estimación de los costos de operación y mantenimiento	40
Observaciones y recomendaciones generales	44
2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	45
3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	52
Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales	52
Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales	54
Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares	58
Resumen de inversión, techo financiero.....	63
4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	67
Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	67
Aspectos Clave de los Lineamientos	68
Programa de inversión anual	71
Bibliografía.....	76

Índice de Tablas

Tabla 1: Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR Norponiente.....	14
Tabla 2: Dimensiones Clarificadores Secundarios PTAR Norponiente I.....	15
Tabla 3: Dimensiones Tanque de Contacto de Cloro PTAR Norponiente	15
Tabla 4: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua.....	20
Tabla 5: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo	24

Tabla 6: Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)	29
Tabla 7: Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente	31
Tabla 8: Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)	32
Tabla 9: Caracterización del agua tratada de este Estudio (<i>E.coli</i> y Huevos de helminto)	35
Tabla 10: Cumplimiento del agua tratada	36
Tabla 11: Coordinada de pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR	37
Tabla 12: Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales	40
Tabla 13: Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M.	42
Tabla 14: Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Norponiente I	46
Tabla 15: Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Norponiente I y II	48
Tabla 16: Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio	53
Tabla 17: Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	63
Tabla 18: Monto de inversión, millones de pesos	64
Tabla 19: Estimación detallada de costos PTAR Norponiente I	65
Tabla 20: Estimación detallada de costos PTAR Norponiente II	66
Tabla 21: Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado Norponiente I	71
Tabla 22: Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado Norponiente II	73

Índice de Figuras

Figura 1 Vista General PTAR Norponiente I	9
Figura 2 Diagrama de flujo de proceso actual PTAR Norponiente I	12
Figura 3 Cárcamo final de agua cruda e hidrocribas en la línea de infiltración de excedentes de agua cruda	16
Figura 4 Unidad de pretratamiento	16
Figura 5 Filtro rociador 1 y 2, respectivamente	17

Figura 6 Cárcamo de elevación y recirculación al filtro rociador; Caja distribuidora “B” y by pass agua pretratada a lodos activados	17
Figura 7 Sección anóxica del reactor de lodos activados y cabezal de aeraación del reactor de lodos activados	17
Figura 8 Clarificador secundario 2; clarificador secundario 1 y cárcamo de recirculación y purga de lodo	18
Figura 9 Tanque de contacto de cloro; caseta de cloración y scrubber para neutralización de fugas de cloro	18
Figura 10 Agua tratada efluente del tanque de contacto de cloro y bombas de agua de servicios	18
Figura 11 Pozos de infiltración de agua tratada.....	19
Figura 12 Cárcamo de purga y recirculación de lodo; mesa de espesado de purga de lodo secundario	22
Figura 13 Celda 3 del digestor de lodos, celda 1 del digestor de lodos	23
Figura 14 Caseta de desaguado de lodo digerido; filtros banda para desaguado de lodo	23
Figura 15 Patio de secado adicional de lodo desaguado; equipo para volteo y aereación de trincheras de lodo	23
Figura 16 Caracterización del agua cruda (sep-2020)	31
Figura 17 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)	33
Figura 18 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)	34
Figura 19 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)	35
Figura 20 Pozos de infiltración PTAR Norponiente I	38
Figura 21 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m ³	43
Figura 22 Vista actual de la PTAR Norponiente.....	46
Figura 23 Diagrama de flujo de la PTAR Norponiente con las acciones propuestas	51
Figura 24 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	64
Figura 25 Inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR.....	75

A decorative graphic consisting of three wavy, horizontal lines in blue, green, and grey, located on the left side of the page.

1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más

Descripción general de la PTAR Norponiente I

La PTAR Norponiente I se localiza dentro de la zona urbana de Cancún. El área de servicio de la planta es la zona norponiente de la ciudad localizada al norte de la Av. José López Portillo y su continuación como carretera a Mérida; delimitada al este por las avenidas 137, Chac Mool, 20 de Noviembre, Calle 18 y prolongación Av. Kabah; y al oeste, por el límite de los asentamientos habitacionales regulares.

Aguakan es responsable de la operación y mantenimiento de la PTAR, así como de la obtención de los recursos económicos requeridos para su ampliación, modernización, rehabilitación y sustitución de equipos.

En la actualidad la totalidad del agua tratada producida por la PTAR Norponiente I se dispone en el subsuelo mediante pozos de infiltración. En la Figura 1 se presenta la vista general satelital de la PTAR Norponiente.



Figura 1 Vista General PTAR Norponiente I

Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases

La PTAR Norponiente I inició su operación en el año 2005, tiene capacidad nominal para tratar un caudal medio de 200 L/s, la información proporcionada por Aguakan indica que el caudal medio tratado en el año 2021 y 2022 fue de 199 L/s.

La planta se asienta en un terreno con superficie aproximada de 20 hectáreas, con espacio suficiente para futuras ampliaciones. A la fecha se está ejecutando la construcción de la PTAR Norponiente II, la cual tendrá capacidad para tratar un caudal medio de 200 L/s.

A continuación se indican las operaciones y procesos que conforman el tren de tratamiento de la PTAR Norponiente I, el valor entre paréntesis indica el número de unidades:

Tren de tratamiento de agua:

- + Cárcamo final
- + Pretratamiento mecánico: cribado fino (2), desarenado y desengrasado en conos (2)
- + Filtro biológico (2)
- + Cárcamo de elevación y recirculación a filtro biológico (1)
- + Reactor de lodos activados con etapa anóxica para remoción de nitrógeno (1), no

opera

- + Clarificación secundaria (2)
- + Desinfección con gas cloro, caseta confinada con scrubber para neutralización de fugas
- + Tanque de contacto de cloro (1)
- + Pozos de infiltración de agua tratada (9)

Tren de tratamiento de lodos:

- + Espesado de lodo secundario en mesa (1)
- + Digestión aerobia (3 celdas), aireación difusa mecánica
- + Desaguado mecánico, en filtro banda (2)
- + Destino del lodo desaguado, se traslada dentro de la planta a patio de secado adicional de lodo.

En la PTAR Norponiente II se efectuará la estabilización, mediante digestión anaerobia, del lodo secundario de la PTAR I, el lodo secundario se enviará ya espesado a la PTAR II. El desaguado del lodo digerido se efectuará en la PTAR II.

Descripción general del proceso

El agua residual ingresa al cárcamo final dentro de la PTAR Norponiente desde donde se bombea hacia la plataforma de pretratamiento. El pretratamiento consta de dos canales con cribado medio y cribado fino automático. Posteriormente el agua pasa a un cono desarenador para separar arenas y natas del agua residual.

El agua pretratada se dirige hacia dos filtros rociadores, el distribuidor de agua de los filtros opera con un motorreductor en el centro y distribuye el agua con cuatro brazos horizontales. El agua efluente del filtro ingresa a un cárcamo de recirculación y elevación. El cárcamo tiene la función de recircular agua al filtro rociador y también de bombear agua hacia el reactor de lodos activados. En este cárcamo ingresan los retornos de agua recuperada de espesado y desaguado.

Desde el cárcamo de elevación, el agua se envía a una caja distribuidora y actualmente se reparte hacia los clarificadores secundarios; próximamente se enviará hacia el reactor de lodos activados.

El reactor está diseñado para la remoción de nitrógeno por nitrificación-desnitrificación biológica, y cuenta con dos secciones anóxicas y tres secciones aerobias. Las secciones anóxicas, sin aireación, cuentan con agitadores sumergibles para mantener la biomasa suspendida. Adicionalmente, cuenta con bombas para recircular internamente licor mezclado del final del reactor, en la zona aerobia, al inicio de la zona anóxica.

En el futuro el licor mezclado se conducirá hacia los clarificadores secundarios, donde se separa la biomasa del agua. Desde esta unidad se realiza el retorno de lodos a los reactores y la purga de lodo. El agua clarificada se conduce hacia el tanque de contacto de cloro para su desinfección mediante cloro gas. El agua tratada se envía hacia los ocho pozos de infiltración. Cada pozo de infiltración cuenta con un medidor de flujo para registrar la cantidad de agua descargada, dado que algunos pozos tienen más capacidad que otros.

El lodo secundario purgado se manda hacia la mesa espesadora de lodo y una vez espesado cae por gravedad al digestor aerobio de lodo.

La aireación del reactor y digestor se realiza por aire difuso. El lodo digerido se envía por bombeo a desaguado en filtros banda.

Diagrama de flujo de proceso

Para facilitar la comprensión de los procesos de tratamiento, más adelante, en la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo simplificado del proceso actual de tratamiento de agua y lodos.

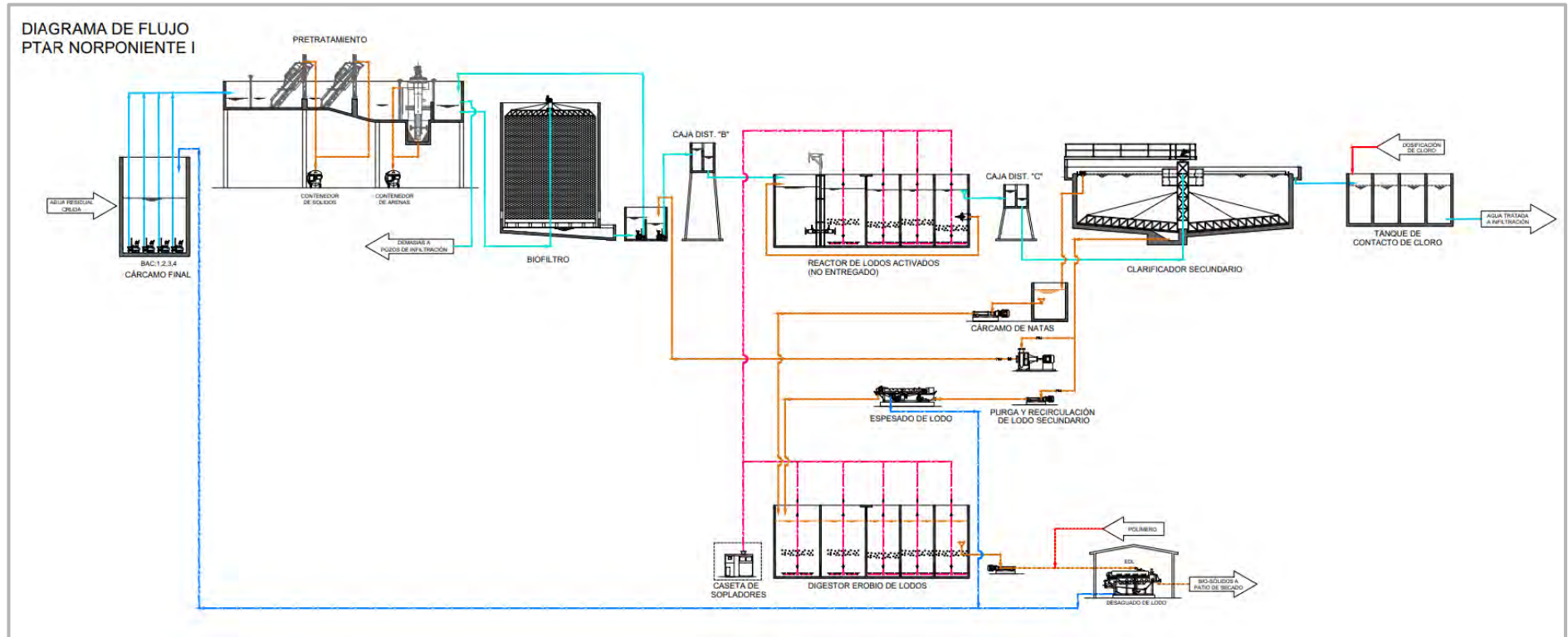


Figura 2 Diagrama de flujo de proceso actual PTAR Norponiente I

Descripción de las unidades de proceso

Como parte del trabajo de campo elaborado en este Estudio, se recopiló información sobre las características, dimensiones y condiciones de operación y mantenimiento de las unidades de proceso de la PTAR.

Tren de Tratamiento de Agua

Cárcamo final

Cuenta con tres equipos de bombeo de tipo sumergible instalados y operando, de 50 hp. Con preparación para instalar otros tres equipos, de este cárcamo se hará la alimentación de agua cruda a la PTAR Norponiente II.

Pretratamiento

Dos unidades, ambas en operación. Cuenta con cribado medio/fino mecánico tipo tambor rotatorio con tornillo transportador/prensa de sólidos. Cuenta con cono desarenador / desengrasador, equipo con aereación, rastras y brazo desnatador. Las arenas removidas se envían a equipo clasificador de arena y se disponen como residuo. Las grasas se descargan por gravedad a un tanque almacén de PEAD, se envían por bombeo al digestor aerobio de lodos. Se cuenta con by pass de agua pretratada a la caja distribuidora C, para su envío directo al reactor de lodos activados; con medición de flujo.

Filtro biológico

Son dos unidades, ambas en operación, diseñados con alta eficiencia de remoción de DBO. El diámetro de los filtros es de 32 metros y la altura de material plástico de empaque 6.1 metros. Su brazo distribuidor es de cuatro brazos con control de velocidad de rotación en la tornamesa.

Cárcamo de elevación y recirculación a filtro biológico

Recibe el efluente de los filtros biológicos, así como la corriente de retorno de los clarificadores secundarios. Las bombas de elevación son tres de 70 hp, con variador de frecuencia. Envían el efluente del filtro biológico hacia la caja distribuidora “B”, en la actualidad la corriente fluye de la caja hacia clarificadores secundarios; en el futuro, hacia el reactor de lodos activados. Las bombas de recirculación son cuatro de 30 hp, actualmente dos equipos en operación.

Reactor de lodos activados

Es una unidad nueva; el reactor consta de etapa preanóxica con mezcladores sumergibles, seguida por la sección aereada, con recirculación interna de licor mezclado a la etapa anóxica. La aereación es tipo difusa, con platos, los sopladores son tipo turbo (3 equipos). El reactor se construyó en el año 2021, el equipamiento de proceso y electromecánico está casi concluido, sólo están pendientes algunos detalles de los sopladores. Se tiene programado efectuar la puesta en marcha del reactor a partir de diciembre de 2022.

En la Tabla 1 se presentan las dimensiones del reactor de lodos activados.

Tabla 1:
Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR Norponiente

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	1
Secciones por reactor		Anóxicas: 2 Aerobias: 3
Largo por sección anóxica	m	24.6
Ancho por sección anóxica	m	10.5
Largo por sección aerobia	m	33.5
Ancho por sección aerobia	m	7.4
Tirante hidráulico	m	6.0
Volumen total	m ³	Volumen anóxico: 3,100 Volumen aerobio: 4,462

La planta de emergencia tiene capacidad para respaldar los sopladores del nuevo reactor de lodos activados.

Clarificador secundario

Son dos unidades, con rastras y brazo desnatador con accionamiento en columna central. La recirculación y purga de lodo secundario se efectúa a través de un cárcamo tipo húmedo común para ambos clarificadores, cuenta con dos bombas de recirculación en operación más una de respaldo. En la Tabla 2 se presentan las dimensiones de los clarificadores secundarios.

Tabla 2:
Dimensiones Clarificadores Secundarios PTAR Norponiente I

Concepto	Unidad	Valor
Diámetro	M	22.8
Número de unidades	No.	2
Área	m ²	408.3
Tirante hidráulico, SWD	M	3.0
Volumen	m ³	1,224

Desinfección

La planta cuenta con un tanque de contacto de cloro, durante la visita se observó calidad del agua regular a mala, turbia y con arrastre de sólidos. La desinfección se efectúa con gas cloro, tienen un sistema completo con básculas y cilindros de 908 kg, grúa para izaje e instalación de cilindros, sensores de fugas, etcétera.

La central de cloración es de tipo confinado y con scrubber químico para el control y neutralización de las fugas de gas cloro. Cuentan con una planta de emergencia dedicada para los sistemas de desinfección y de control y neutralización de fugas.

Se efectúa medición de caudal total de agua tratada en el efluente del tanque de contacto de cloro. Las dimensiones del tanque de contacto de cloro se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3:
Dimensiones Tanque de Contacto de Cloro PTAR Norponiente

Concepto	Unidad	Valor
Volumen	m ³	770
Canales	No.	5
Largo – ancho canal - tirante	m	22.0 – 2.0 – 3.5

Disposición y aprovechamiento de agua tratada

Agua tratada de mala calidad, sin aprovechamiento o reúso. Cuenta la planta con un total de 9 pozos de infiltración, de los cuales dos son para infiltrar demasías del cárcamo final. Se tiene medición de caudal en los nueve pozos de infiltración de agua tratada o demasías.

Vistas del tren de tratamiento de agua

De la Figura 3 a la Figura 11 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de agua de la PTAR.



Figura 3 Cárcamo final de agua cruda e hidrocribas en la línea de infiltración de excedentes de agua cruda



Figura 4 Unidad de pretratamiento



Figura 5 Filtro rociador 1 y 2, respectivamente



Figura 6 Cárcamo de elevación y recirculación al filtro rociador; Caja distribuidora "B" y by pass agua pretratada a lodos activados



Figura 7 Sección anóxica del reactor de lodos activados y cabezal de aeración del reactor de lodos activados



Figura 8 Clarificador secundario 2; clarificador secundario 1 y cárcamo de recirculación y purga de lodo



Figura 9 Tanque de contacto de cloro; caseta de cloración y scrubber para neutralización de fugas de cloro



Figura 10 Agua tratada efluente del tanque de contacto de cloro y bombas de agua de servicios



Figura 11 Pozos de infiltración de agua tratada

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua

Con el fin de verificar que las principales estructuras de proceso del tren de tratamiento de agua sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes en el agua cruda, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para tal efecto se utilizaron las dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior, los datos de caudal y calidad de agua cruda utilizados son los siguientes:

- + Caudal medio de diseño 200 L/s
- + Calidad de agua cruda promedio (histórico)
 - DBO, 413 mg/L
 - SST, 392 mg/L

En la Tabla 4 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de agua, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR Norponiente con las dimensiones de las estructuras, en caso de no contar con algún dato de operación se asignó un valor promedio del rango típico.

Acorde al esquema de operación que informó Aguakan, una vez que entre en operación el reactor de lodos activados, únicamente estará en operación uno de los dos filtros biológicos y se efectuará el by-pass del 50% del agua pretratada al reactor de lodos activados, por lo que para esta evaluación se considera un caudal influente al filtro biológico de 100 L/s.

Los rangos de referencia utilizados aplican para procesos de lodos activados con remoción de nitrógeno.

Tabla 4:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Norponiente
Filtro biológico			
Caudal medio que ingresa al FR	L/s	No aplica	100
Carga orgánica volumétrica	kg/m ³ -d	0.4 a 1.8	0.73
Porcentaje de remoción de DBO en FR esperado	%	70 a 90%	70%
Reactor de Lodos Activados			
Concentración de DBO influente al reactor	mg/L	No aplica	269
Concentración de SSTLM	mg/L	3,000 - 4,000	3,500
Fracción volátil		0.7 a 0.8	0.75
Relación F/M	kg/kg - d	0.2 a 0.6	0.23
Carga volumétrica	KgDBO/m ³ - d	0.3 a 1.6	0.61
Tiempo hidráulico de retención total	horas	5 a 15	10.5
Tiempo hidráulico de retención zona anóxica	horas	1 a 3	4.3
Tirante hidráulico	m	4.5 a 7.5	6.0
Clarificador Secundario			
Carga hidráulica superficial, Caudal medio	m ³ /m ² -d	16 a 28	21
Recirculación de lodo secundario	%	25 a 100%	100%
Recirculación interna	%	100 a 400%	

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Norponiente
Carga de sólidos, Caudal medio	Kg/m ² - h	5 a 8	6.2
Tirante hidráulico	m	4 a 5	3.0
Tanque de contacto de cloro			
Tiempo hidráulico de retención	min	30	64.2

¹ Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + Los principales criterios de diseño del filtro biológico, reactor de lodos activados, clarificadores secundarios y tanque de contacto de cloro están dentro de los rangos típicos recomendados en la bibliografía especializada.
- + El tiempo hidráulico de retención de la zona anóxica es un poco mayor al rango típico dada la alta concentración de NTK en el agua cruda.
- + Se recomienda considerar mayor profundidad de pared lateral para el futuro clarificador.
- + Acorde al tiempo hidráulico de retención, el tanque de contacto de cloro tiene capacidad para tratar el doble de caudal medio de diseño actual (400 L/s).

Tren de Tratamiento de Lodo

Espesado de lodo

Como se mencionó anteriormente, la purga de lodo secundario se efectúa a través de un cárcamo húmero, se cuenta con dos bombas en operación y una de respaldo, de aquí se envía el lodo secundario al espesador de lodos.

El espesado de lodo secundario, se efectúa en una mesa espesadora de 2.0 metros de ancho de banda, instalada sobre la celda central del digestor de lodos, con arreglo de tuberías para descargar en las tres celdas.

Digestor aerobio de lodo

La digestión de lodos es de tipo aerobio en tres celdas con volumen unitario de 1,100 m³, tirante hidráulico de 5.0 metros.

Además del lodo secundario, el digestor recibe las natas del pretratamiento y natas secundarias por bombeo.

Se cuenta con cuatro sopladores para digestión de tipo centrífugo multi etapa de 125 hp, todos operativos, el personal de operación indica que con dos equipos operando es suficiente.

Las bombas de lodo digerido envían el lodo al equipo de desaguado, se tienen tres equipos en operación, tipo desplazamiento positivo.

Desaguado de lodo y secado

El desaguado se realiza con filtros banda de 1.2 metros de ancho de banda instalados en una caseta de dos niveles. Actualmente se encuentra en servicio uno de los dos de los equipos, el otro equipo no opera por problemas de comunicación con su tablero de control.

Se cuenta con un sistema compacto de preparación de polímero con base líquida, con bombas dosificadoras para el equipo espesador y los equipos de desaguado

La descarga del lodo desaguado se efectúa por gravedad a un camión de volteo o góndola para ser enviado al secado adicional.

Para el secado adicional se tiene un patio de 1.0 hectáreas, con piso de asfalto y cubierta plástica ligera con tensores de acero, misma que recientemente se retiró. Se instalará cubierta fija tipo invernadero, con ventiladores de para extracción de humedad.

Se tiene un equipo autopropulsado especializado para el volteo y aereación de las trincheras de lodo en proceso de secado.

Vistas del tren de tratamiento de lodo

De la Figura 12 a la Figura 15 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de lodo de la PTAR.



Figura 12 Cárcamo de purga y recirculación de lodo; mesa de espesado de purga de lodo secundario



Figura 13 Celda 3 del digestor de lodos, celda 1 del digestor de lodos



Figura 14 Caseta de desaguado de lodo digerido; filtros banda para desaguado de lodo



Figura 15 Patio de secado adicional de lodo desaguado; equipo para volteo y aereación de trincheras de lodo

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de lodos

Con el fin de verificar que las principales estructuras y equipos de proceso del tren de tratamiento de lodo sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño más relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para esta evaluación se consideraron las siguientes premisas de cálculo:

- + Dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior.
- + Producción de lodos, se estimó con base en la fórmula simplificada de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) con los datos de caudal medio de diseño y calidad de agua cruda promedio del histórico (SST y DBO), mismos que se utilizaron para la evaluación del tren de agua (US EPA, 1993).
- + Para determinar el volumen de lodos se utilizaron las concentraciones típicas esperadas en la purga de lodo secundario y purga de lodo primario con químicos.
- + De manera conservadora, se consideró que los equipos mecánicos de espesado y desaguado de lodo operan 5 días por semana 16 horas por día.
- + En la Tabla 5 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de lodo, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR Norponiente con las dimensiones de las estructuras y capacidades de equipos, en caso de no contar con algún dato de operación se consideró un valor promedio del rango típico.

Tabla 5:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Norponiente
Producción de lodo			
Producción de lodo esperada	kg SST /día	No aplica	6,260
Concentración		0.5 a 1.5%	0.7%
Flujo volumétrico	m ³ /día	No aplica	894
Espesado de Lodo (mesa)			
Captura de sólidos	%	90 a 98%	95%

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Norponiente
Carga de sólidos (por metro)	kg/h	200 a 600	274
Carga hidráulica (por metro)	L/s	6.7 - 16	11
Concentración de lodo espesado esperada		4 a 9%	4.0%
Volumen de lodo espesado estimado	m ³ /día		149
Masa de lodo espesado estimada	kg SST/día		5,947
Digestión Aerobia de lodo			
Carga de sólidos volátiles	kgSSV/m ³ -d	1.6 a 4.8	1.3
Tiempo de retención hidráulico (edad de lodo, 28°C)	días	18 a 20	22
Destrucción esperada		38 a 50%	42%
Masa de lodo digerido estimada	kg SST /día		4,288
Desaguado de Lodo (filtro banda)			
Captura de sólidos	%	>95%	95%
Carga de sólidos (por metro)	kg/h	250 a 410	313
Carga hidráulica (por metro)	L/min	150 a 340	181

1 Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + Con las condiciones evaluadas, los equipos de espesado y desaguado así como el digester de lodo operan dentro o por debajo de los rangos recomendados en la bibliografía.

Estado de conservación y operación de las instalaciones

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de agua de la PTAR Norponiente I, evaluadas con base en el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelo cárstico en DQO, SST, NT y PT con el promedio histórico de calidad de agua, se clasifican como **“Malas”**. En la sección **Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada**, se presenta la evaluación de dicha información.

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de lodos, determinadas con base en la situación operativa y de desempeño de las operaciones de espesado, digestión y desaguado observadas en la visita, se clasifican como **“Regulares”**. En términos generales las condiciones actuales de mantenimiento de los trenes de tratamiento de agua y de lodos se consideran **“Regulares”**.

La PTAR Norponiente I es una instalación de tratamiento relativamente reciente, con 17 años en operación, la primera etapa entró en funcionamiento en el 2005. El diseño de sus operaciones y procesos se efectuó con base en objetivos de calidad de agua tratada distintos, para calidad 30/30 de DBO y SST, respectivamente, y sin necesidad de remover nutrientes.

El proceso de tratamiento original es tipo Dual, en la modalidad de filtro biológico y reactor de contacto de sólidos. El reactor de lodos activados se construyó hasta el año 2012 y por problemas estructurales no entró en operación, siendo demolido en el año 2020. En el 2021 y 2022 se efectuó la construcción y equipamiento del nuevo reactor con remoción de nitrógeno, aereación difusa y sopladores tipo turbo, mismo que no inicia su operación.

La obra civil de tanques, edificaciones, vialidades (terracerías) y las áreas verdes se observan en regulares condiciones de mantenimiento. Está en ejecución una ambiciosa obra de mejoramiento que incluye construcción y rehabilitación de vialidades vehiculares, peatonales, áreas jardinadas y mejora de las edificaciones, las obras iniciaron en mayo de 2022 y su terminación está prevista en diciembre de 2022.

Las tuberías y líneas de conducción de las diversas corrientes de agua y de lodos de la PTAR I se observan en buenas condiciones de mantenimiento, lo mismo aplica para las líneas de conducción de aire del nuevo reactor de lodos activados.

Las tuberías de conducción de aire y lodos relacionadas con el digestor aerobio de lodo, modulado en tres celdas de operación en paralelo, están en condiciones regulares de mantenimiento.

Actualmente se está efectuando la sustitución de los difusores existentes por difusores nuevos de burbuja fina así como de los bajantes en cada celda del digestor, ya que el sistema de aireación presentaba fugas y mala distribución de aire.

La obra e instalaciones eléctricas, como son la subestación principal, los Centros de Control de Motores, las redes de fuerza y de alumbrado exterior, se observan en buenas condiciones de mantenimiento. Las obras de mejoramiento arriba referidas incluyen componente de inversión en

la parte eléctrica y automatización de la planta.

En el Anexo 1 (Ficha de la PTAR) se presenta la descripción detallada de las características y condiciones actuales de operación y mantenimiento de las estructuras y equipos del tren de agua y lodos.

Análisis de calidad del agua cruda

Calidad de agua cruda, histórica

Se incluyen diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos, la información fue proporcionada por Aguakan, los análisis fueron efectuados por el laboratorio interno del organismo operador. Los datos de calidad de agua cruda y tratada proporcionados por el organismo operador se encuentran en el apartado Bases de Datos.

Los parámetros incluidos en las bases de datos de Aguakan son los siguientes:

- + Temperatura
- + pH: Potencial de hidrógeno
- + Conductividad
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos sedimentables
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Sólidos suspendidos volátiles (SSV)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO_2) (efluente)
- + Nitrógeno de nitratos (NO_3) (efluente)
- + Nitrógeno amoniacal (N-NH_3)
- + Nitrógeno total (NT) (efluente)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)
- + Coliformes fecales
- + Cloro residual libre
- + Transmitancia (efluente)
- + Absorbancia (efluente)

Debido a que los resultados de los muestreos fueron previos a la actualización de la NOM-001-SEMARNAT-2021, las bases de datos no incluyen los parámetros adicionales de la nueva norma, como color verdadero, toxicidad y *E. Coli*, así mismo incluyen parámetros que no son objeto de estudio en la actual norma, sin embargo, si permiten determinar la calidad de los procesos de tratamiento del agua residual.

Se proporcionaron datos de 198 muestreos efectuados en el influente durante el periodo del año 2020 al 2021 de tipo compuesto.

A continuación se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros analizados en el agua

cruda de la PTAR Norponiente I.

Tabla 6:
Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)

Concepto	Q prom. L/s	pH	SST mg/L	SSV mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	G & A mg/L	NTK mg/L	PT mg/L
No. de datos	195	198	198	198	100	198	24	100	12
Mínimo	63.6	7.1	132	110	181	188	25.0	66.69	11.90
1° cuartil	213.3	7.5	320	231	341	877	79.3	99.95	13.90
Promedio	224.3	7.5	392	298	413	993	93.3	107.81	14.39
Mediana	227.6	7.5	367	287	404	1,003	95.5	107.62	14.15
3° cuartil	240.9	7.6	440	340	469	1,089	108.8	118.38	14.68
Máximo	326.5	8.0	1,210	960	752	2,018	155.0	155.17	19.20

Calidad de agua cruda, de este Estudio

Del 19 al 20 de septiembre se efectuó un muestreo compuesto de 24 horas tanto en el influente y efluente de la PTAR Norponiente I, este se efectuó con seis muestras simples, a cada una de estas se les realizaron los siguientes análisis de campo:

- + pH
- + Temperatura del agua
- + Cloro residual libre (efluente)

Los parámetros analizados en el laboratorio fueron los siguientes:

- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)

- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)
- + Escherichia coli (efluente)
- + Toxicidad Vibrio fischeri (efluente)
- + Huevos de helminto
- + Color verdadero (UV-Vis) a 436, 525 y 620 nm

Las actividades de colecta, preservación y análisis de las muestras fueron realizadas por personal de Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis (Intertek + ABC Analytic), éste cuenta con la acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA) en la rama de agua número AG-096-029/11 para su laboratorio ubicado en la ciudad de México y AG-096-029/11_S1 para el laboratorio de Mérida, que es donde se realizarán los análisis.

En todos los casos, la preservación y el almacenamiento de las muestras se efectuaron de acuerdo con los lineamientos que establece la normatividad mexicana. Las muestras colectadas fueron preservadas con hielo a una temperatura de 4°C con la intención de que no se degradaran, y fueron transportadas en una hielera al laboratorio correspondiente para su análisis.

El transporte se hizo con sumo cuidado, de tal forma que se evitaron los derrames y/o contaminación de muestras debido a rupturas de frascos o cualquier otro accidente.

Los diferentes frascos que integran las muestras se preservaron con los reactivos señalados en la normatividad.

En la Figura 16 se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Norponiente I. En el Anexo 3 se presentan los resultados completos del laboratorio del influente y efluente de la PTAR Norponiente.

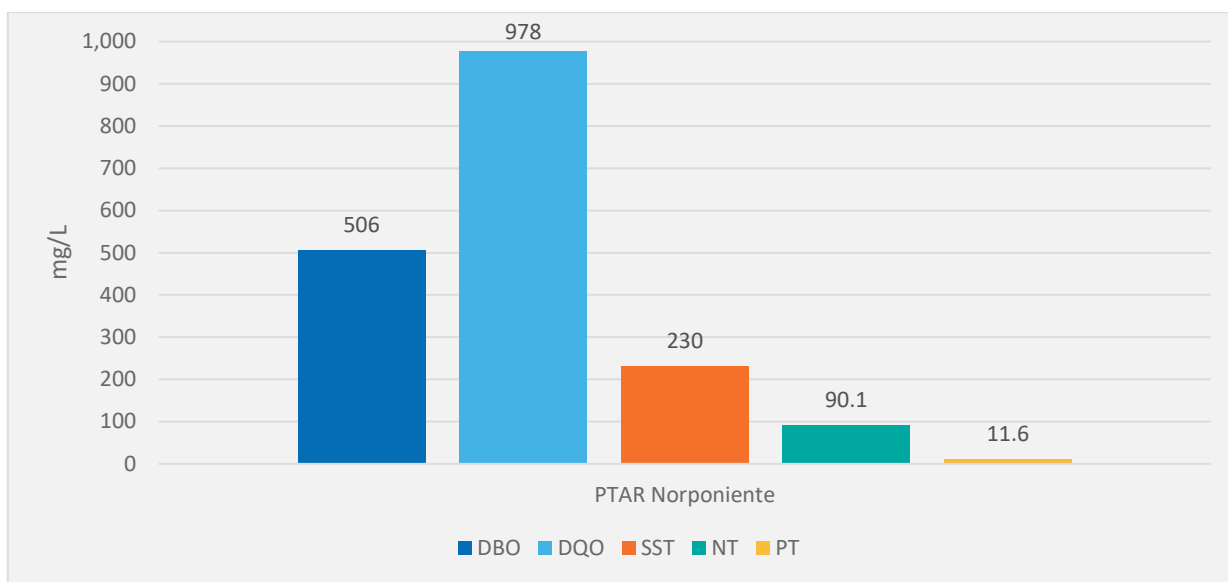


Figura 16 Caracterización del agua cruda (sep-2020)

Con la finalidad de conocer la relación de contaminantes, se realizaron los cálculos que a continuación se presentan en la siguiente tabla, los cuales fueron determinados con el promedio histórico (2020-2021) y el valor obtenido en este Estudio.

Tabla 7:
Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente

Relación	Promedio (2020-2021)	Valor Estudio 2022	Rango típico en Aguas Residuales Municipales ¹
DBO5/ DQO	0.42	0.52	0.45 – 0.55
SST/ DBO	0.95	0.45	0.80 – 1.20
SSV / SST	0.76	Sin dato	0.70 – 0.80
NTK/ DBO	0.26	0.18	0.10 – 0.20
Fósforo/ DBO	0.03	0.02	0.02

¹ (US EPA, 1993)

De las relaciones anteriores destaca el valor bajo de SST obtenido en este estudio en relación de la concentración de DBO. De los valores históricos se observa alta relación NTK/DBO lo cual hace más compleja la remoción de nitrógeno.

Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada

En las siguientes figuras y tablas se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada del histórico de datos proporcionados por Aguakan y de los obtenidos en el presente Estudio, en estas se presentan los límites permisibles (LP) establecidos en la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelo cárstico.

Calidad de agua tratada, histórica

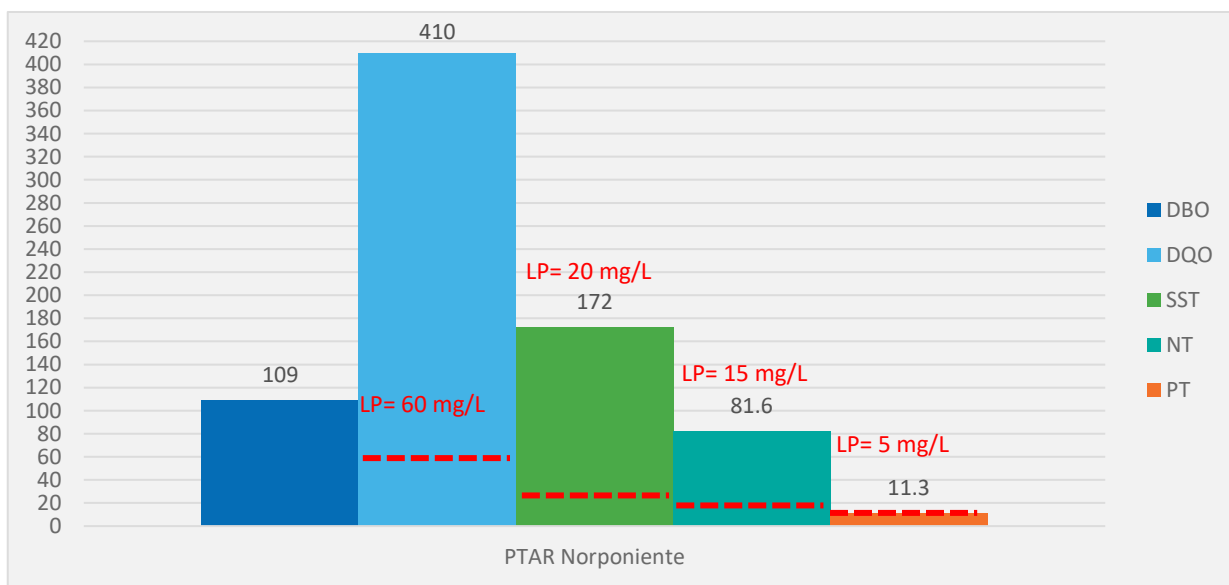
Se proporcionaron datos de 198 muestreos de tipo compuesto efectuados en el efluente durante el periodo del año 2020 al 2021.

En la siguiente tabla se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros en el agua tratada de la PTAR Norponiente I.

Tabla 8:
Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)

Concepto	Q prom. L/s	SST mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	G & A mg/L	NTK mg/L	NT mg/L	PT mg/L
No. De datos	195	198	100	198	24	100.00	100.00	12
Mínimo	63.6	50	38	159	5.0	39.68	41.40	6.49
1° cuartil	213.3	104	82	324	17.8	70.49	71.12	10.53
Promedio	224.3	172	109	410	28.9	80.61	81.61	11.29
Mediana	227.6	150	101	386	25.5	79.90	81.00	11.75
3° cuartil	240.9	210	123	472	38.8	91.77	92.62	12.80
Máximo	326.5	630	303	1,093	67.0	130.22	131.11	13.40

A manera de resumen en la Figura 17 se presentan los valores promedio de los principales parámetros del agua tratada de la PTAR Norponiente I, en esta se indican los límites permisibles (LP) para el promedio mensual en la NOM-001-2021.



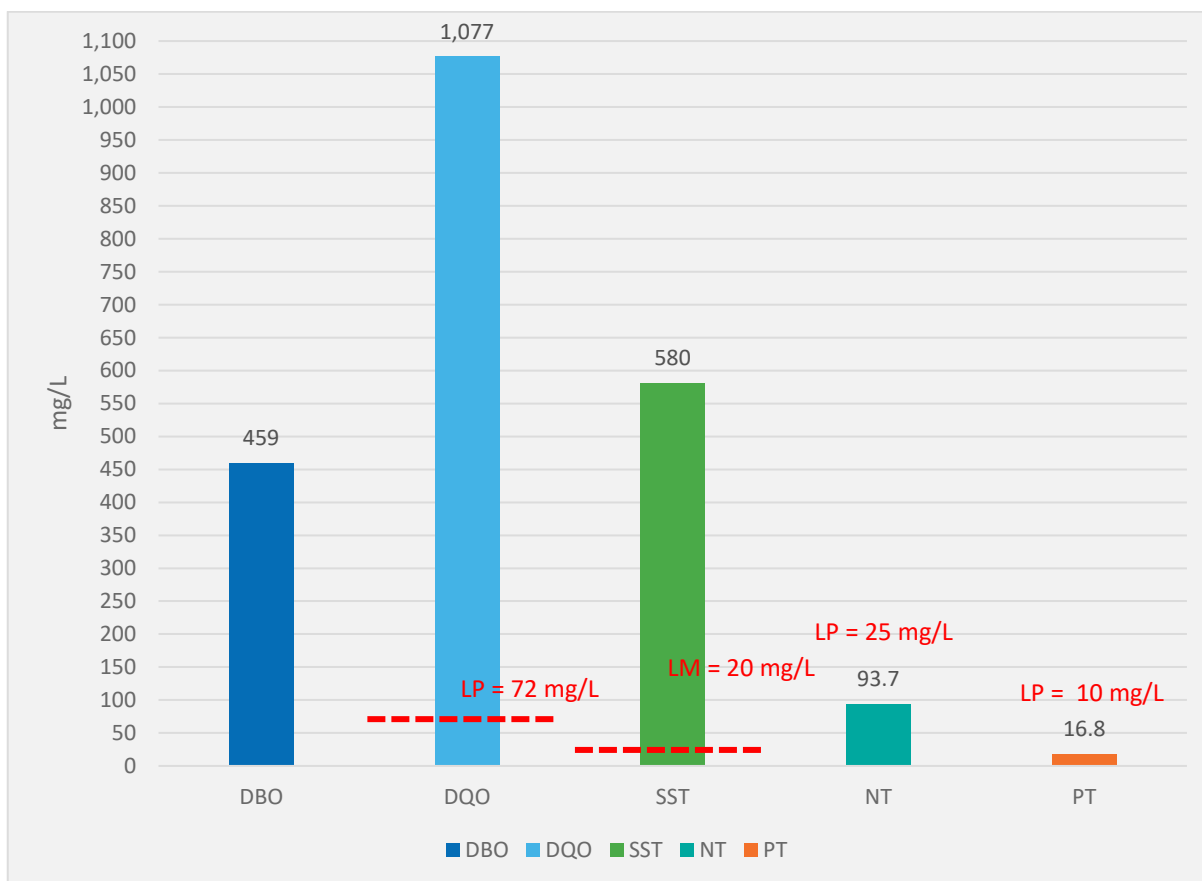
LP = Límite permisible

Figura 17 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)

Acorde al promedio histórico en el filtro biológico se obtiene un porcentaje de remoción de DBO de aproximadamente el 75% acorde a su valor de diseño, sin embargo, es de esperarse que mientras no opere el reactor de lodos activados el agua tratada no cumpla con la calidad requerida en la NOM-001.

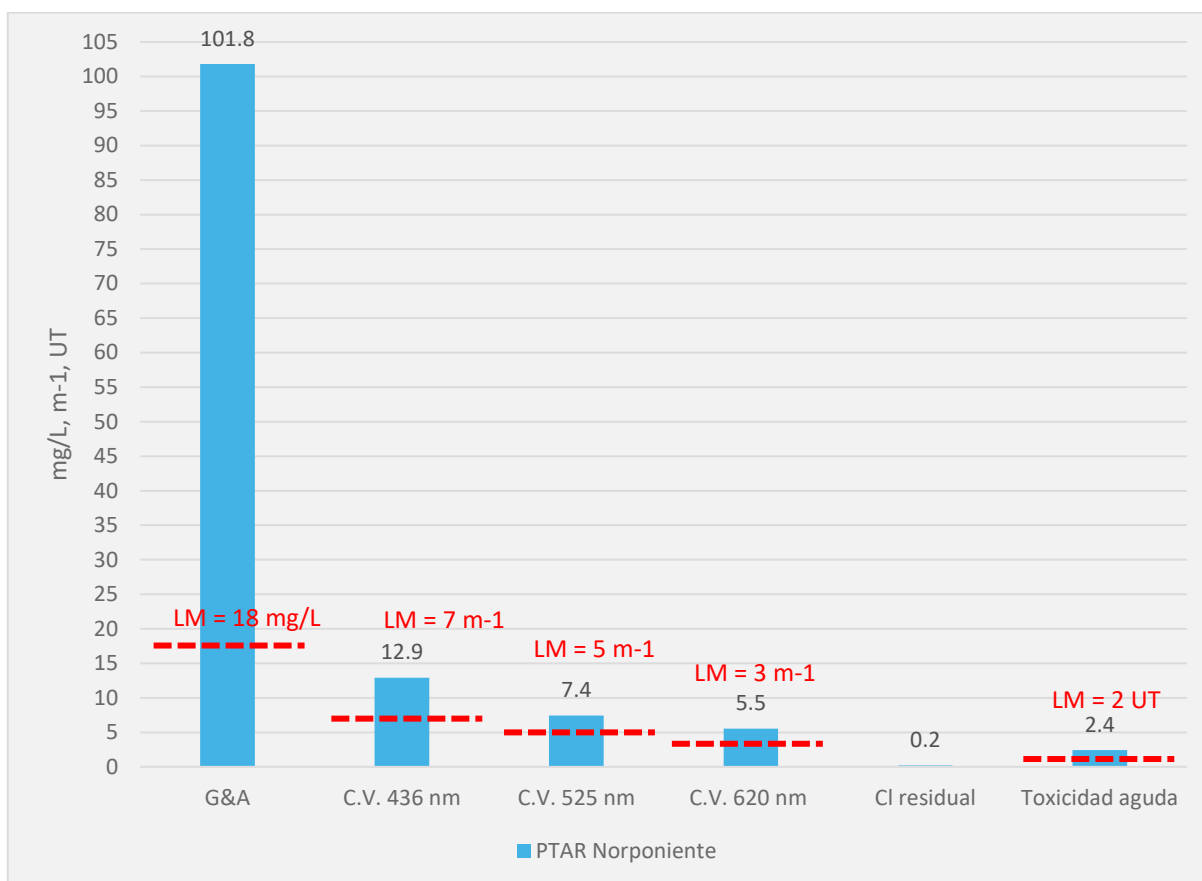
Calidad de agua tratada, de este Estudio

En la siguientes figuras y tabla se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada de la PTAR Norponiente I, en estas se indican los límites permisibles para el promedio diario en la NOM-001-2021.



LP = Límite permisible

Figura 18 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 19 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)

Tabla 9:
Caracterización del agua tratada de este Estudio (*E.coli* y Huevos de helminto)

		PTAR Norponiente I	Límite permisible NOM-001-2021
E.coli	NMP/100 mL	>2,400,000	100
Huevos de helminto	HH/L	<0.2	1

Con la información histórica de calidad de agua tratada proporcionada por Aguakan y los resultados de los análisis efectuados se efectuó el análisis del cumplimiento de los principales parámetros de calidad del agua con respecto a la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021, para los

valores de los datos históricos se utilizó el límite permisible del valor promedio mensual y para los resultados de los muestreos efectuados en este estudio se utilizó el límite permisible del valor promedio diario.

Tabla 10:
Cumplimiento del agua tratada

Parámetro	Valor promedio histórico (2020-2021) (mg/L)	Valor Estudio 2022 (mg/L)	Límite permisible NOM-001-2021	Cumple
SST	172	580	PM = 20 (mg/L) PD = 24 (mg/L)	NO
DQO	410	1,077	PM = 60 (mg/L) PD = 72 (mg/L)	NO
Nitrógeno total	81.6	93.7	PM = 15 (mg/L) PD = 25 (mg/L)	NO
Fósforo total	11.3	16.8	PM = 5 (mg/L) PD = 10 (mg/L)	NO

PM= promedio mensual, PD = promedio diario

Con respecto al resto de parámetros, color verdadero, toxicidad aguda y *E. Coli*, también estuvieron por encima del límite permisible, el único que estuvo dentro fueron los huevos de helminto.

Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua

Como parte de las actividades realizadas en campo, se registraron las coordenadas de los pozos de infiltración de cada PTAR, utilizando un equipo GPS map 60Cx marca Garmin.

En la Tabla 11 se presentan las coordenadas de localización de los ocho pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR Norponiente I. Posteriormente, en la Figura 20 se presentan fotografías correspondientes al levantamiento de las coordenadas con GPS y de los registros o brocales de los pozos de infiltración.

Tabla 11:
Coordenada de pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR

No. de pozo	Coordenadas Latitud	Coordenadas Longitud
1	21.18168	-86.89388
2	21.18131	-86.89366
3	21.18107	-86.89908
4	21.18146	-86.89431
5	21.18084	-86.89952
6	21.18095	-86.89428
7	21.18015	-86.89407
8	21.18017	-86.8936



Figura 20 Pozos de infiltración PTAR Norponiente I

Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR

Pendiente de incorporar, no se ha recibido la información por parte de Aguakan.

Costos reales de operación y mantenimiento (O & M)

De acuerdo a la información proporcionada por Aguakan, el costo total de O & M de la PTAR Norponiente I en el año 2021 fue de 18.51 millones de pesos (mdp's), desagregado de la siguiente forma:

+	Costo de operación:	14.41 mdp's
+	Costo de mantenimiento:	4.10 mdp's

Considerando que el caudal medio de agua tratada en el año 2021 fue de 199 L/s, que representan un volumen anual de 6,275,664 m³, el costo unitario de O & M de la PTAR fue de 2.95 \$/m³ de agua tratada.

En relación a la energía eléctrica consumida en el proceso de tratamiento, la información proporcionada indica los siguientes valores anuales:

+	Consumo anual de energía:	2,645,088 kWh
+	Costo anual:	\$ 6,775,962

A partir de los valores previos se calcularon los siguientes indicadores:

+	Costo unitario de la energía.	2.56 \$/kWh
+	Consumo unitario de energía:	0.42 kWh/m ³
+	Costo energía respecto al costo O & M:	37 %

En la información de costo de O & M, así como en la de consumo y costo de energía eléctrica se debe tener en cuenta que la PTAR Norponiente I el agua tratada no cumple con la calidad establecida en la NOM-001 previa y actual; aunado a que el reactor de lodos activados con remoción biológica de nitrógeno aún no está en operación, por lo que el proceso de tratamiento de agua consta sólo del filtro biológico.

Estimación de los costos de operación y mantenimiento

A efecto de comparar el costo de operación reportado por Aguakan contra un costo de referencia se procedió a estimar los costos anuales de un grupo de insumos relevantes:

- + Energía eléctrica,
- + Cloro para desinfección,
- + Polímero para espesado y/o desaguado de lodo,
- + Acarreo de lodo desaguado, y
- + Análisis de laboratorio de agua tratada y lodo para cumplimiento normativo y control de proceso
- + Personal de O & M

Para lo anterior, con base en un caudal medio de 200 L/s y la información de caudal y calidad de agua cruda y tratada proporcionada por el Organismo Operador se efectuó un balance de materia simplificado para establecer la masa de DBO removida, la generación de lodos en el tratamiento del agua, la remoción de sólidos suspendidos volátiles en el proceso de digestión y la masa de lodo desaguado a disposición.

Una vez definidos en el balance de materia los valores requeridos, a partir del caudal y calidad del agua cruda influente a la planta, se procedió a aplicar los factores de dosificación o consumo de los principales insumos (energía eléctrica, cloro polímero para espesado y/o polímero para desaguado) con base en las prácticas adecuadas de operación y, en el caso de los análisis de laboratorio de agua tratada y lodos, a partir de los requerimientos normativos.

En la siguiente tabla se presentan las consideraciones aplicadas para establecer el consumo de los insumos arriba indicados, así como el costo unitario asignado:

Tabla 12:
Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Energía eléctrica	Caudal medio de agua tratada y concentración promedio de DBO	1.76 kWh/kgDBO	2.50 \$/kWh
Cloro	Caudal medio de agua tratada	5.0 mg/L	20 \$/kg

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Polímero para espesado	Producción de lodo con base en caudal medio y concentración promedio de DBO y SST	4.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Polímero para desaguado	Fracción volátil del 75 % del lodo producido y remoción del 40 % de SSV en digestor	7.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Acarreo lodo desaguado, base húmeda	Lodo desaguado al 20 % de sólidos Masa de lodo en base seca/0.20	No aplica, secado adicional y almacenamiento en la propia PTAR	No aplica
Análisis laboratorio Agua tratada	NOM-001 población > 50 mil habitantes	2 muestreos/mes	8,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Lodo / biosólidos	NOM-004 Mayor de 1,500 hasta 15,000 (base seca)	2 muestreos/año	10,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Control de proceso	---	1 lote por mes	6,000 \$/mes

El costo del mantenimiento preventivo de la PTAR y los consumibles asociados a esa actividad se estimó aplicando el criterio de destinar un importe anual equivalente al 0.85 % del costo de inversión de la planta con sus actuales características. El costo de la planta se estableció a partir de un costo base de 750 mil pesos por litro – segundo de capacidad media instalada.

Para establecer el costo del personal de operación y mantenimiento se considera una plantilla “tipo” de doce personas, misma que se desagrega en las siguientes plazas: 1 Jefe de planta, 2 Supervisores de operación/mantenimiento, 5 operadores y 4 auxiliares de operación o mantenimiento.

Los sueldos considerados para establecer este rubro de costo están en el rango de 28,000 pesos mensuales para el Jefe de planta y de 12,000 pesos por mes para el auxiliar de operación, los sueldos del resto del personal están comprendidos dentro de este rango.

Los sueldos nominales se afectaron por un factor de 1.50 para incorporar el costo de las diversas prestaciones y seguridad social del personal. De esta forma se determinó un costo

total mensual de\$ 306, 000 por concepto de personal.

El factor unitario de consumo de energía eléctrica asignado permite establecer para la PTAR Norponiente I, además de la energía consumida, otros indicadores con el siguiente valor:

- + Consumo unitario de energía: 0.80 kWh/m³
- + Potencia media de operación: 1,448 kilowatts

En la Tabla 13 se presentan los consumos e importes anuales de los rubros de costo establecidos, así como el costo unitario de cada rubro, al dividir su importe anual entre el volumen de agua tratada. Posteriormente, en la Figura se presenta de manera grafica el costo unitario desagregado por insumo.

Tabla 13:
Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M

Insumo	Consumo anual	Importe anual, \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Energía eléctrica	5,073,007	12,682,518	2.01
Cloro	31,536	630,720	0.10
Polímero para espesado	11,466	1,719,973	0.27
Polímero para desaguado	16,053	2,407,963	0.38
Acarreo lodo desaguado	10,033	---	0.00
Análisis laboratorio		284,000	0.05
Mantenimiento		1,275,000	0.20
Personal de O & M		3,672,000	0.58
Total		22,672,174	3.59

Energía eléctrica consumo anual expresado en KWH; cloro, polímero para espesado y polímero para desaguado, en kg; acarreo de lodo, en toneladas.

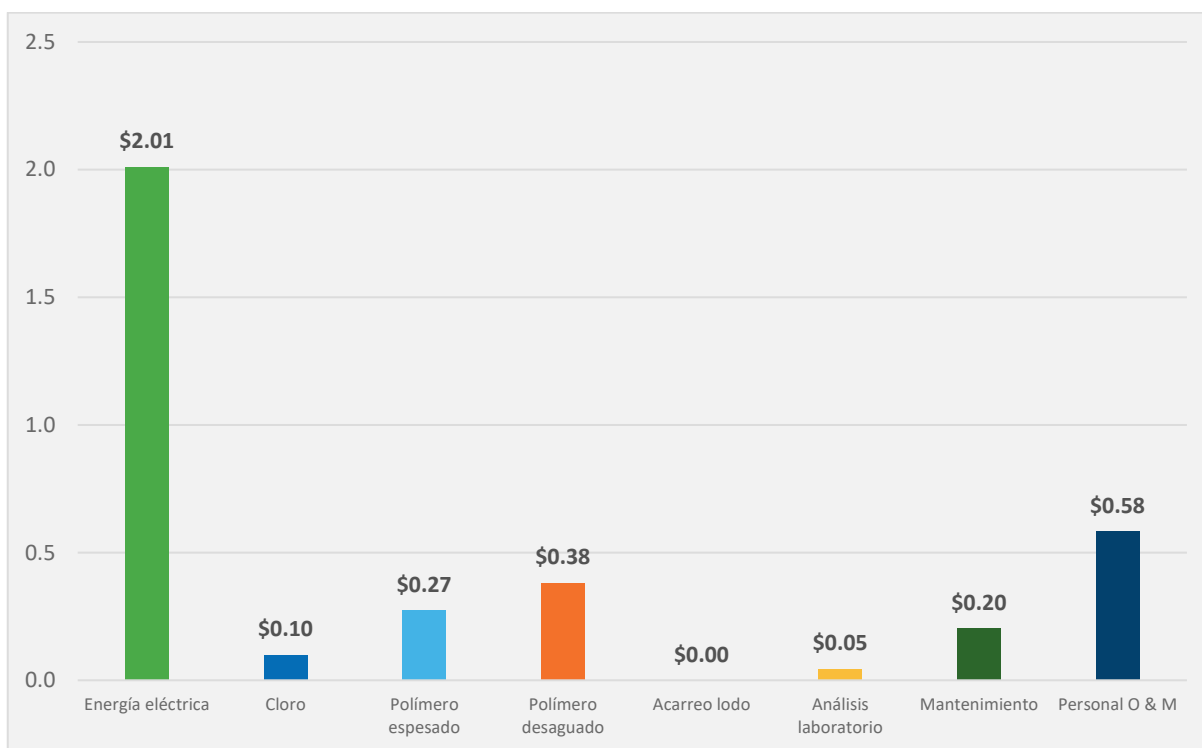


Figura 21 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m³

El importe anual de operación y mantenimiento estimado en esta sección es de 22.67 millones de pesos, que representa un costo unitario de O & M de 3.59 \$/m³ de agua tratada.

Al comparar el importe estimado anual de O & M con el importe reportado por Aguakan, de 18.51 millones de pesos, se tiene en el costo estimado un excedente de 4.16 mdp's con respecto al reportado, que representa $\approx 18\%$.

La diferencia de costos se explica en parte porque el reactor de lodos activados empezó a operar en el tercer trimestre del año pasado, en tanto que la estimación asume su operación constante; por lo que el importe obtenido se considera razonable, dados los criterios y premisas generales con las que se estimó el costo de O & M de la PTAR Norponiente I.

Por lo antes expuesto, se considera que el costo de O & M reportado por Aguakan es adecuado y refleja las condiciones de operación y mantenimiento observadas en las visitas efectuadas a la planta, así como en la evaluación de la calidad de agua tratada producida.

Observaciones y recomendaciones generales

A continuación se presentan las observaciones y recomendaciones que se desprenden de la evaluación de la información proporcionada por Aguakan y del diagnóstico en campo y gabinete de la PTAR Norponiente:

1. El reactor de lodos activados de la PTAR I, si bien se construyó recientemente, su diseño se efectuó para una concentración efluente de 25 mg/L de nitrógeno total. Este valor es el límite permisible promedio mensual establecido para descargas a Ríos, arroyos, canales, drenes, Zonas marinas mexicanas y estuarios, en el proyecto de modificación PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017, que se publicó en el DOF el 5 de enero de 2018, año en que se elaboró el proyecto ejecutivo de la PTAR.
2. Por lo anterior será necesario efectuar las adecuaciones mecánicas, hidráulicas y/o civiles para cumplir el límite máximo de 15 mg/L para suelo cárstico. Asimismo, será necesario incorporar una etapa para remoción de fósforo.
3. Para tener la relación de materia orgánica y nitrógeno necesaria para la denitrificación es necesario operar con un sólo filtro biológico y derivar entre el 50 y 60% del agua pretratada, por lo tanto es adecuado el esquema de operación que informa Aguakan tendrá una vez que inicie operación el reactor de lodos activados.
4. Se recomienda mantener el filtro biológico que presente mejores condiciones de mantenimiento y dismantelar el más deteriorado.
5. Como ya se señaló, el lodo secundario de la PTAR Norponiente I será enviado por bombeo hacia el tanque de lodo espesado de la PTAR II, continuando en dicha planta el proceso de digestión anaerobia, seguida del desaguado de lodo digerido y secado adicional en patio cubierto. Este esquema disminuye las labores de operación concentrando en una sola PTAR estas dos etapas del proceso.
6. La mesa existente de espesado de lodo secundario se mantendrá en operación, ya que el lodo secundario de la PTAR I se enviará a la planta II ya espesado.
7. Los filtros banda existentes se mantendrán operativos como equipos de respaldo a las centrífugas que se instalarán en la PTAR II, con capacidad suficiente para el lodo de ambas plantas. Es necesario habilitar el tablero de control del filtro banda que no está operando actualmente.
8. Se recomienda incorporar desinfección UV a mediano plazo.

A decorative graphic consisting of three wavy, horizontal lines in blue, green, and grey, located on the left side of the page above the section header.

2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En la PTAR Norponiente I actualmente se desarrollan actividades complementarias de mejora de proceso, equipos y urbanización de la planta, se incluye el nuevo reactor de lodos activados con sección anóxica y aerobia. La terminación de las acciones de mejora está prevista en diciembre de 2022.

La PTAR I enviará los lodos generados hacia el tren de lodos de la PTAR Norponiente II contigua, misma que está iniciando su construcción.

De la PTAR Norponiente II, desde hace varios años está construida y equipada la etapa de pretratamiento, la sedimentación primaria, el tanque de lodos espesados y otras unidades auxiliares, todas fuera de operación.

En agosto de 2022 iniciaron las obras de construcción de la PTAR II con capacidad para un caudal medio de 200 L/s. El contrato se adjudicó a la empresa Mitsui que es responsable del proyecto, construcción, equipamiento, puesta en marcha y operación transitoria.

El contrato se licitó con base en las especificaciones y límites máximos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1997 para cuerpo tipo C, por lo que incluye remoción de nitrógeno y fósforo.

El plan de acciones propuesto para la PTAR Norte I considera que el caudal medio se mantiene sin cambio respecto al actual, que es de 200 litros por segundo.



Figura 22 Vista actual de la PTAR Norponiente

En la Tabla 14 se presenta el resumen de las acciones propuestas para que la PTAR Norponiente I cumpla con las especificaciones y límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para las descargas a suelo cárstico.

Tabla 14:
Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Norponiente I

Etapa de Tratamiento	Norponiente I
TREN DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	Existente
Regulación agua cruda/pretratada	No aplica

Etapas de Tratamiento	Norponiente I
Sedimentación primaria	No aplica
Filtro biológico	Se decomisiona uno de los dos filtros
Biológico remoción DBO	Existente
Biológico remoción de fósforo	Se incorpora
Biológico remoción nitrógeno	Existente, mejoramiento
Filtración terciaria	No aplica
Desinfección	Cloro gas, existente (UV a mediano plazo)
TREN DE LODO	
Espesado	Existente
Digestión aerobia	Se decomisiona
Digestión anaerobia	Lodo espesado se bombea a NPTE II
Desaguado	Existente

Para la PTAR Norponiente II el tren de tratamiento de agua previsto por Aguakan consta de las siguientes etapas: pretratamiento (ya construido), sedimentación primaria (ya construido), reactor de lodos activados tipo A2O (sección anaerobia, anóxica y aerada), clarificación secundaria, filtración terciaria y desinfección ultravioleta.

El tren de lodos de la PTAR Norponiente II constará de: espesador gravitacional de lodo primario, espesado mecánico de purga de lodo secundario, digestión anaerobia de lodos, desaguado en centrífugas de lodo digerido; el biogás generado en la digestión anaerobia será aprovechado en un sistema de cogeneración.

En la Tabla 15 se presenta la descripción y características de las acciones propuestas de rehabilitación, mejoramiento o incorporación de etapas y/o equipos para la PTAR Norponiente I.

Tabla 15:
Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Norponiente I y II

Etapa de tratamiento	Norponiente I	Norponiente I
TREN DE AGUA		
Pretratamiento	1. No requiere acciones específicas para cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	1. Cribado grueso, cribado fino, y desarenación vórtice; prensa de sólidos y clasificador de arena; 2. Construido por Aguakan, aun no opera
Tratamiento Primario	1. No aplica	1. Sedimentador primario 2. Construido por Aguakan, aun no opera
Tratamiento Secundario	1. Sacar de operación uno de los dos filtros biológicos existentes. 2. Incorporar tanque anaerobio para remoción biológica de fósforo, o • Efectuar precipitación química de fósforo en clarificador secundario o, de manera temporal, en tanque de contacto de cloro. 3. Aumentar el volumen de la sección anóxica y, probablemente, de la aerobia del nuevo reactor, con volumen adicional junto al tanque anaerobio. • Aumentar la recirculación interna para remoción y cumplimiento del Nitrógeno Total.	1. Reactor tipo A2O con secciones anaerobia, anóxica y aerobia, para remoción biológica de nitrógeno y fósforo. 2. Sopladores tipo turbo 3. Precipitación complementaria de fósforo, con PAC, previo a clarificación
Clarificación Secundaria		1. Clarificación secundaria

Etapas de tratamiento	Norponiente I	Norponiente I
Tratamiento Terciario	2. No aplica	1. Filtración terciaria de disco parcialmente sumergido, con claro de malla de 10 micras.
Desinfección	1. Se utiliza la caseta de cloración y el tanque de contacto de cloro existentes	1. Desinfección con sistema ultravioleta
TREN DE LODO		
Espesamiento de lodos	1. No requiere acciones	1. Espesador gravitacional de lodo primario • Construido por Aguakan, aun no opera 2. Mesa espesadora para purga de lodo secundario
Digestión de lodos	1. No requiere acciones • El lodo espesado se enviará a PTAR Norponiente II.	1. Digestión anaerobia de lodos, tipo mesofílico con mezclador tipo propela • Para lodos de PTAR I y II 2. Incluye tratamiento de biogás, gasómetro, y cogeneración
Desaguado de lodos	1. No requiere acciones • El lodo se desaguará en PTAR Norponiente II. • Los filtros banda existentes quedan como respaldo.	1. Desaguado en centrífugas. 2. Secado adicional de lodo desaguado en patio cubierto y con ventilación forzada. 3. Tratamiento lateral con adición de cal para precipitar fósforo en corriente de desaguado de lodo.
Secado adicional de lodo desaguado	1. En patio existente, mismo que se rehabilitará con cubierta tipo invernadero y ventiladores para extracción de humedad, previsto	1. Se efectuará en patio existente, mismo que se rehabilitará con cubierta tipo invernadero y

Etapas de tratamiento	Norponiente I	Norponiente I
	en la inversión de PTAR Norponiente II	ventiladores para extracción de humedad
TEMAS VARIOS	1. Incorporar medición en línea de Nitratos y Nitrógeno amoniacal para mejor control de proceso. 2. Incorporar medición en línea de SST y/o turbiedad para control de la desinfección	1. Incluye medición de flujo en las corrientes de agua y lodo. 2. Incluye sensores para el control de proceso, enfocados a la eficiencia energética, ahorro de reactivos y control de la calidad del agua tratada 3. Incluye variadores de frecuencia para los principales equipos de la PTAR.

En la Figura 23 se presenta el diagrama de flujo del tren de tratamiento de agua y de lodos de la PTAR Norponiente I incorporando las acciones propuestas para que la planta produzca agua tratada que cumpla con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas a suelo cárstico.

Diagrama de Flujo PTAR Norponiente I, AGUAKAN

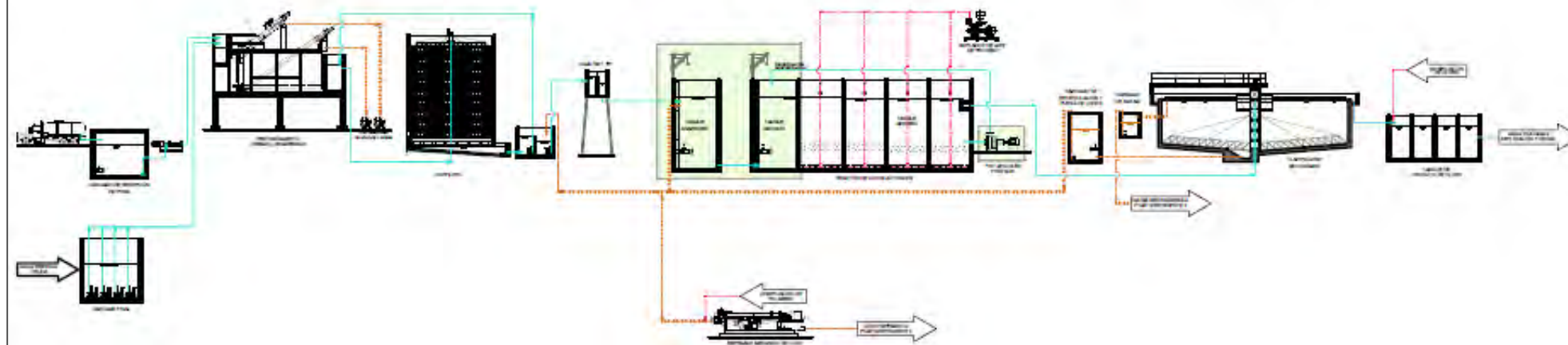


Diagrama de Flujo PTAR Norponiente II, AGUAKAN

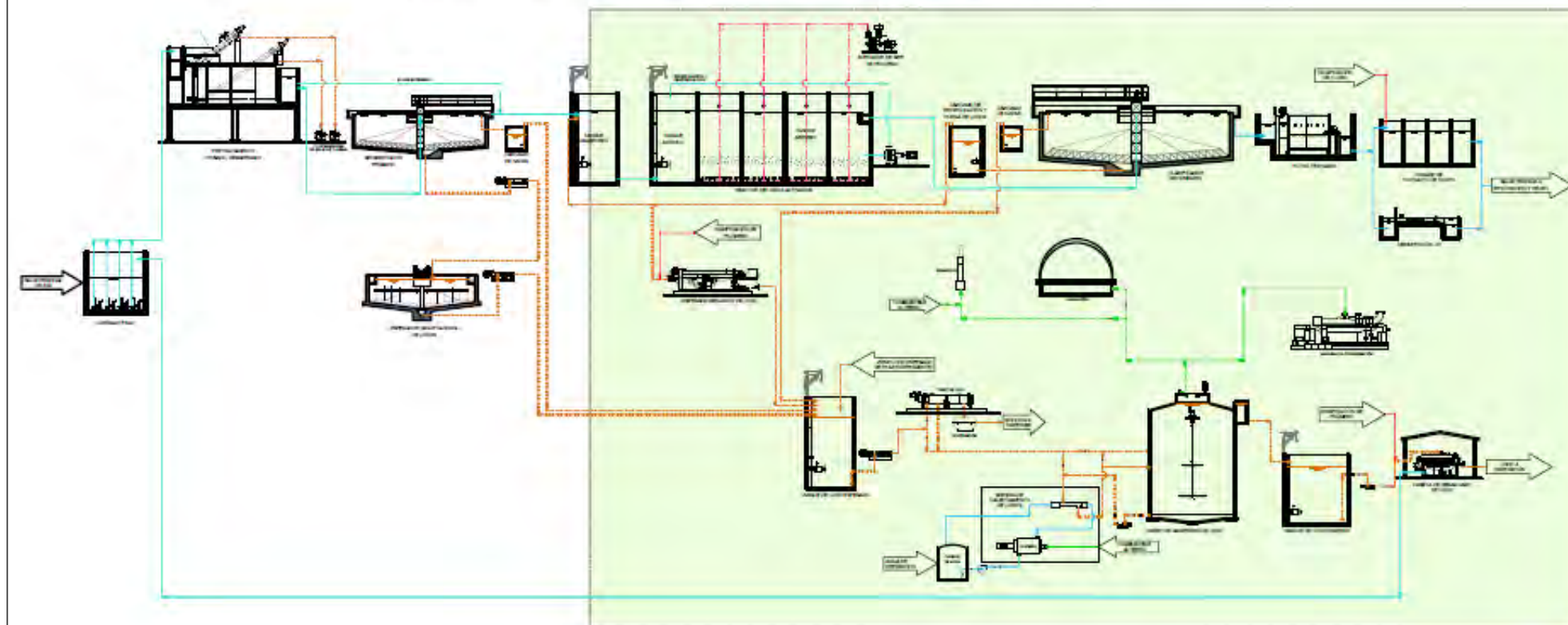


Figura 23 Diagrama de flujo de la PTAR Norponiente con las acciones propuestas

Three wavy lines in green, blue, and grey extend from the left edge of the page towards the center, positioned above the section header.

3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el procedimiento realizado para la estimación de costos de las acciones necesarias por ejecutar para que la PTAR Norponiente cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; en dicho presupuesto se incluye el costo de obra civil, electromecánica, eléctrica, instrumentación y control para obra nueva o ampliaciones, rehabilitación de obras existentes y proyecto ejecutivo y supervisión de obra y proyecto ejecutivo.

Las acciones de mejora surgen de la visita y diagnóstico técnico que se presenta previamente, así como de las entrevistas e información recabada con las áreas responsables de la operación y gestión de los recursos para saneamiento.

Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales

El techo financiero para la implementación de las acciones de mejora y rehabilitación de la PTAR, se realizó a partir de costos paramétricos, como lo indican los Términos de Referencia.

Para lo anterior se recurrió a costos base de unidades de proceso y equipamiento similares y de capacidad comparable con las necesidades de las PTAR que forman parte de este estudio, de igual manera dichos costos son ajustados de acuerdo a la capacidad necesaria.

En la Tabla 16 se muestran los costos base por unidad de proceso, los cuales corresponden al costo de mercado establecido en proyectos realizados en el año 2021 y 2022 en Quintana Roo, en plantas de tratamiento con proceso de remoción biológica de nitrógeno y fósforo, así como equipamiento electromecánico y de proceso, tanto de tipo convencional como relativamente nuevo en la región, como es la filtración terciaria y la desinfección con lámparas ultravioleta.

Tabla 16:
Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio

Unidad de proceso	Costo base en MDP
Tren de Tratamiento de Agua	
Pretratamiento mecánico	20.97
Regulación agua cruda/pretratada	12.65
Sedimentación primaria	13.12
Caja distribuidora agua primaria	0.99
Filtro biológico	
Biológico remoción DBO	22.99
Biológico remoción de fósforo	2.50
Biológico remoción nitrógeno	5.75
Clarificación secundaria	14.80
Recirculación y purga de lodo	6.89
Filtración terciaria	12.12
Desinfección	10.49
Pozo de infiltración	1.60
Tren de Tratamiento de Lodo	
Espesado de lodo	7.79
Digestión aerobia	16.09

Unidad de proceso	Costo base en MDP
Digestión anaerobia	59.55
Tanque de lodo digerido	3.77
Desaguado de lodo	17.43
Cogeneración	18.81

Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con las acciones a realizar en la PTAR se estimaron los costos de inversión, esto de acuerdo con los costos base y el factor de ajuste, los cuales están relacionado con el caudal de tratamiento.

A continuación se describe el procedimiento aplicado a cada planta de tratamiento (identificada como PTAR "n") para establecer el techo financiero preliminar de los recursos económicos requeridos para implementar el plan de acciones:

1. Los costos de referencia de las unidades de proceso se ajustaron a valores de noviembre de 2022 con el factor de actualización que resulta de dividir el INPC de noviembre entre el INPC del mes en que se originó el presupuesto.

A manera de ejemplo, a continuación se describe el procedimiento:

- Fecha del presupuesto de la unidad de proceso o PTAR de referencia: octubre de 2021.

- Valor del INPC en octubre de 2021: 115.561

- Valor del INPC de noviembre de 2022: 125.997

- Factor de actualización costo de referencia: $125.997/115.561 = 1.090$

2. El costo de referencia del proceso de digestión anaerobia y del sistema de cogeneración se determina con base en un digestor anaerobio con sistemas periféricos; tamizado de lodo, tratamiento lateral de la corriente de desaguado de lodo anaerobio; antorcha de quemado de biogás, gasómetro para almacenar el biogás generado, acondicionamiento de biogás; caseta de equipos de digestión y sistema de cogeneración.

En la siguiente tabla se presenta el desglose y capacidad de los componentes de las etapas de digestión anaerobia de lodos y del sistema de cogeneración:

Etapa de Digestión Anaerobia de Lodo

Concepto	Importe actualizado, mdp
Tamizado de lodo (capacidad para 5 L/s de lodo espesado al 5%)	1.22
Digestor anaerobio mesofílico (de 5,700 m ³)	43.25
Gasómetro de membrana y periféricos (de 1,000 m ³)	6.14
Quemador de biogás y periféricos (capacidad para 225 m ³ /h)	1.59
Edificios operativos	2.71
Tratamiento lateral del agua retirada en desaguado de lodo	4.64
Subtotal	59.55
Obra eléctrica (12 % del subtotal)	7.44
Control (3 % del subtotal + obra eléctrica)	2.01
Contingencias (8 % del subtotal + obra eléctrica + control)	5.52
Total	74.53

Sistema de Cogeneración

Concepto	Importe actualizado, mdp
Sistema de tratamiento de biogás (capacidad para 225 m ³ /h) para remoción de humedad, impurezas y H ₂ S	7.10
Sistema integral de cogeneración (capacidad de 500 kW eléctricos)	11.72
Total	18.81

El costo actualizado de las unidades de proceso se ajustó posteriormente en función de la capacidad (a caudal medio) de las unidades de proceso de la PTAR "n", en relación con la capacidad de la PTAR de referencia, acorde a lo siguiente:

$$\text{Costo PTAR "n"} = \text{Costo PTAR de referencia} * ((\text{Tamaño PTAR "n"} / \text{Tamaño PTAR referencia})^{0.70})$$

La capacidad de la PTAR de referencia es para un caudal promedio de 150 L/s.

A manera de ejemplo, al utilizar la ecuación anterior, y considerando que la PTAR "n" es de 350 L/s de capacidad, se obtiene un multiplicador de 1.81, mismo que se aplica sobre el importe de las unidades de proceso de la PTAR de referencia.

De esta forma, en lugar de ajustar el costo de la PTAR "n" con una relación lineal entre el tamaño de ambas plantas (2.33), el criterio toma en cuenta que el costo unitario de inversión (\$ por L/s de capacidad) disminuye al aumentar el tamaño de la unidad de proceso y/o de la PTAR.

Este procedimiento de ajuste de costo se utilizó en las unidades de proceso cuyo dimensionamiento está determinado por la capacidad y carga hidráulica, como es el caso de las etapas que a continuación se indican:

- Pretratamiento (cribado y desarenación)
- Regulación y/o bombeo de agua cruda/pretratada
- Sedimentación primaria
- Caja distribuidora agua primaria
- Clarificación secundaria
- Recirculación y purga de lodo
- Filtración terciaria
- Desinfección
- Tanque de lodo digerido

Asimismo, el procedimiento de ajuste de costo descrito en este numeral también es aplicable en los procesos biológicos de tratamiento de agua y en las operaciones y procesos del tren de tratamiento de lodos, cuando en la PTAR "n" se presenta la condición de carga influente orgánica y de sólidos que se describe en el siguiente numeral.

3. El factor de ponderación arriba referido se utiliza de manera directa si la carga contaminante influente a la PTAR "n", expresada como la concentración promedio de la DBO y SST en el agua residual cruda, es comparable a la de ($\leq 20\%$) la PTAR de referencia.

La concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente a la PTAR de referencia es 350 mg/L.

Se considera que el agua residual influente a la PTAR "n" es comparable al agua residual de la PTAR de referencia, cuando la concentración promedio de DBO y SST está en el rango de $\pm 20\%$ a la concentración indicada en el párrafo previo.

4. A continuación se enlistan las operaciones y procesos del tren de tratamiento de agua y de lodos que, en caso de variación mayor al 20 % en la concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente, estarían sujetos a ajuste de costo adicional al ya aplicado en el numeral 3.
 - Filtro rociador

- Reactor de lodos activados, remoción DBO
- Reactor de lodos activados, remoción de fosforo
- Reactor de lodos activados, remoción nitrógeno
- Espesado de lodo
- Digestión aerobia
- Digestión anaerobia
- Desaguado de lodo

En los casos en que la calidad del agua residual influente a la PTAR "n" tiene una variación superior al 20%, hacia arriba o hacia abajo, se procedió a aplicar un ajuste adicional al costo de inversión en las operaciones y procesos del listado inmediato previo.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual influente es $\approx 30\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.05 o 0.90, según corresponda.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual es $\approx 40\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.12 o 0.80, según corresponda.

5. Se aplicó un factor de ponderación para los casos en que la actividad propuesta no es una unidad de proceso nueva y completa, es decir que consiste en la rehabilitación, mejoramiento o complemento de capacidad de una etapa de proceso o unidad existente.

El valor del factor de ponderación asignado en estos casos está en el rango de 0.35 a 0.65, a criterio del especialista, en función del grado de intervención que se requiere para la unidad de proceso en cuestión.

En términos generales, los valores cercanos al límite inferior del rango se aplicaron cuando la acción implicaba rehabilitación civil única o principalmente; los valores cercanos al límite superior se aplicaron cuando la intervención implica también reequipamiento electromecánico.

6. Una vez establecido el importe de inversión por planta de las principales unidades del tren de tratamiento de agua y de lodos, para determinar el importe de otros componentes de la PTAR a dicho importe se aplicó un valor seleccionado de los rangos de porcentaje que a continuación se indican:

Equipo menor:	5 % a 8 %
Vialidades, patios y obras exteriores:	1 % a 5 %
Obra eléctrica:	10 % a 15 %
Automatización y control:	3 % a 5 %

Imprevistos y contingencias:

8 % a 12 %

7. El importe por elaboración del proyecto ejecutivo de las acciones propuestas por planta se determinó a partir de un porcentaje, en el rango del 1.2 % al 3.5 %, mismo que se aplicó sobre el importe total estimado.
8. El costo de la supervisión de la ejecución y puesta en marcha de las obras y equipamiento propuestas en el Plan de Acciones por planta, se estableció aplicando un porcentaje del 3.5 % sobre el importe total estimado, sin incluir los importes correspondientes al costo del proyecto ejecutivo y de capacitación.

Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares

La selección de la digestión anaerobia como proceso de tratamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, orientado a la generación de biogás para su aprovechamiento, o bien la opción de instalar paneles solares en estas plantas, ha sido justificada mediante criterios técnicos específicos. Estos criterios incluyen la capacidad operativa de las plantas, la disponibilidad de espacio físico y las propiedades de la carga orgánica influente. En particular, en el caso de las PTAR ubicadas en el Estado de Quintana Roo, el contexto local en que se encuentra cada planta cobra especial relevancia, dado que las condiciones geográficas, ambientales y de infraestructura turística pueden influir en la viabilidad y eficiencia de cada tecnología implementada.

Este análisis permite una decisión fundamentada, buscando optimizar tanto el rendimiento energético como el aprovechamiento sostenible de los recursos locales.

Antecedentes

Como parte del diagnóstico para el mejoramiento de las PTAR de Quintana Roo mayores a 100 L/s, la digestión anaerobia se considera en las siguientes PTAR:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur que recibe también los lodos de la PTAR Caribe
4. PTAR Saas Tun Ha (a futuro, mediano plazo)

Adicionalmente, la instalación de paneles solares se considera en las siguientes PTAR, de las cuales las primeras tres son instalaciones existentes:

1. PTAR Norte

2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur
4. PTAR El Rey
5. PTAR Saas Tun Ha
6. PTAR San Miguelito
7. PTAR Bicentenario
8. PTAR Centenario

Digestión Anaerobia y Cogeneración

La digestión anaerobia es un proceso biológico mediante el cual los lodos residuales se descomponen en ausencia de oxígeno, generando biogás. El biogás, compuesto principalmente de metano, puede ser aprovechado para producir electricidad y calor mediante sistemas de cogeneración. Además de reducir el volumen de lodos, la digestión anaerobia permite un manejo más eficiente de los residuos, mejorando la sostenibilidad de las plantas al aprovechar el potencial energético del metano.

Los principales aspectos considerados para proponer digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás en las PTAR se presentan en seguida. Todos fueron considerados en conjunto para cada planta.

Condiciones climáticas

La temperatura está relacionada con la velocidad de las reacciones químicas. En el diseño de la digestión anaerobia, la temperatura aumenta la velocidad de hidrólisis y de formación de metano, además disminuye el mínimo tiempo de retención requerido para llegar a una destrucción de sólidos aceptable (38 % en SSV).

Para un proceso mesofílico, que es el seleccionado para las PTAR de Quintana Roo, las temperaturas óptimas se encuentran entre los 30 y 38°C (Metcalf & Eddy, 2014), lo cual es fácilmente alcanzado en la región, con temperaturas de agua residual alrededor de los 30°C todo el año. El no requerir un sistema para control fino de la temperatura es una gran ventaja de toda la zona.

Carga orgánica influente

Se requiere mantener cierta carga orgánica para mantener el equilibrio entre los microorganismos que realizan la digestión anaerobia y mantener una producción de biogás constante. La carga orgánica alimentada al digestor proviene de la fracción de SSV en los lodos generados en el proceso primario y/o secundario y éstos a su vez dependen de las características del agua residual.

En general, la carga orgánica influente necesaria proviene de un análisis detallado del proceso para cada caso, sin embargo, existen lineamientos con reglas generales para anticipar este resultado. En el caso de las PTAR de Quintana Roo, se consideraron para digestión anaerobia

las PTAR que en su operación actual o a capacidad plena, recibieran más de 300 L/s o carga orgánica igual o mayor a 7.5 ton DBO/d, esto de acuerdo con estudios técnicos realizados previamente por GIZ (GIZ México, 2017).

Toxicidad

La digestión anaerobia es un proceso sensible a variaciones de pH y puede verse afectada por la presencia de ciertas sustancias inhibidoras en las aguas residuales. Para la instalación de una nueva PTAR, es fundamental realizar análisis previos para descartar la presencia de estos compuestos que puedan interferir en el proceso. En el presente caso, dado que las PTAR evaluadas ya están en operación, se ha verificado que en los sitios propuestos para la digestión anaerobia no se han registrado historiales de inhibiciones significativas al proceso biológico, lo que garantiza su viabilidad.

Volumen y tipo de lodos generados

Una de las principales ventajas de la digestión anaerobia es la generación de biogás, siendo más eficiente esta generación cuanto mayor es la carga orgánica en los sólidos alimentados. En los sitios propuestos, además de lodos secundarios, se procesan lodos primarios con alto contenido de SSV, lo que incrementa la generación de biogás. Las altas cargas orgánicas influentes a las plantas aseguran buena generación de sólidos, maximizando la eficiencia del sistema de digestión.

Disponibilidad de espacio

Los sitios con propuesta de digestión anaerobia fueron revisados para la disponibilidad de espacio para una unidad de digestión anaerobia junto con gasómetro e instalaciones de cogeneración y manejo de biogás.

Disponibilidad operativa

La digestión anaerobia es una unidad significativamente más compleja que las demás en el tren de tratamiento, lo que demanda mayor capacidad técnica y un personal operativo especializado para su correcta operación a lo largo de la vida útil de la PTAR. En las plantas propuestas, se considera que cuentan con el personal y la capacidad técnica necesarios para implementar y mantener este proceso de manera eficiente.

Viabilidad operativa

Con base en la calidad de agua, la temperatura, el caudal influente y el tipo de proceso, es posible estimar la cantidad de lodos producidos en cada PTAR. Los lodos producidos son la base para estimar el tamaño ideal del digestor anaerobio. De acuerdo con la literatura (Metcalf & Eddy, 2014) el tiempo de retención recomendado para los lodos a 30°C es de 6 a 14 días y la carga orgánica puede variar entre los 1.6 y 4.8 kg SSV/m³ d.

A manera de ejemplo, con el volumen de 5,700 m³/d y a una carga de 2.4 kg SSV/ m³ d sería

posible alimentar hasta 13.7 toneladas al día de lodo. Este flujo másico a una concentración de 3.5 % en sólidos tendría un tiempo de residencia de 14.6 días. La producción de lodo actual de las PTAR seleccionadas para digestión anaerobia varía entre 6.7 y 9.9 toneladas al día, y puede ser aún mayor de acuerdo con la capacidad de tratamiento de agua residual instalada. El volumen seleccionado considera este crecimiento además de las necesidades actuales.

Conclusiones para biogás y cogeneración

Los aspectos anteriores se analizaron y forman parte del análisis de costo presentado. En general en las PTAR seleccionadas es positiva la presencia de la digestión anaerobia. En resumen, para seleccionar las PTAR donde es viable instalar digestión anaerobia se consideró que:

1. La temperatura de la zona es favorable con 30°C.
2. La carga orgánica influente a las PTAR y/o el caudal se encuentran en el umbral de 7.5 ton/d de DBO o 300 L/s de caudal tratado.
3. Los procesos biológicos existentes no presentan obstáculos por sustancias inhibidoras.
4. La presencia de lodo primario favorece la producción de biogás.
5. Existe suficiente espacio para la instalación de las unidades respectivas.
6. Existe suficiente personal operativo y capacidad técnica para mantener la unidad funcionando eficientemente.
7. El volumen seleccionado como base para los costos cubre los rangos de operación actuales y futuros de cada PTAR.
8. En el balance económico, la producción y aprovechamiento del biogás es un instrumento importante para hacer viable la operación de las PTAR más grandes.

Generación de Energía Solar

A diferencia de la digestión anaerobia, la instalación de paneles solares es un proceso más sencillo y viable para prácticamente cualquier PTAR. El criterio principal para su implementación fue la disponibilidad de espacio en la planta y su tamaño, siendo seleccionadas aquellas de mediana o gran escala.

Las plantas que no tienen suficiente carga orgánica para justificar la digestión anaerobia, pero disponen de amplias áreas, pueden aprovechar los paneles solares para reducir su dependencia de la red eléctrica y generar energía renovable de manera sostenible. En consecuencia, esta tecnología se considera para casi todas las PTAR.

El costo de implementación de ambas tecnologías no es equivalente, siendo la digestión anaerobia considerablemente más costosa. Sin embargo, como se muestra en el análisis económico, la generación de biogás a escalas superiores al umbral establecido por la GIZ produce una cantidad significativa de energía eléctrica, generando importantes ahorros a largo plazo. Además, la digestión anaerobia requiere una mayor capacidad técnica para su operación. En contraste, los paneles solares, más sencillos de instalar y mantener, representan

una opción accesible y conveniente para todas las PTAR.

A continuación se presenta una tabla resumen con los principales criterios utilizados para la selección de digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás, así como para la instalación de paneles solares.

		Principales Criterios para selección de Digestión Anaerobia						Criterio de selección para la instalación de Paneles Solares	
Nombre de la planta	Capacidad instalada (L/s)	DBO entrada (mg/L)	Carga orgánica influente (Ton DBO /día)	Carga orgánica > 7.5 ton / día	Sedimentación primaria (Lodo primario)	Disponibilidad operativa	Digestión Anaerobia	Espacio disponible	Paneles solares
Norponiente (Cancun)	200	469	8.1	SI	SI, tendrá lodo primario de Npte II	SI	SI	SI	SI

Resumen de inversión, techo financiero

En la Tabla 17 se muestra el monto de inversión por unidad de proceso o componente de proyecto, y en la Figura 24 se muestra su distribución porcentual.

Tabla 17:
Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Etapa o componente	Importe PTAR Norponiente I, mdp's	Importe PTAR Norponiente II, mdp's
Proyecto ejecutivo	0.35	0.58
Bombeo / regulación / pretratamiento / primario		0.51
Remoción DBO y nutrientes, desinfección	6.57	82.51
Tratamiento terciario		7.68
Tren de tratamiento de lodos		29.81
Digestión anaerobia		48.29
Cogeneración		22.53
Paneles solares		
Equipo menor	0.53	1.57
Terracerías, vialidades, patios	0.26	14.95
Obra eléctrica	0.66	21.49
Automatización y control	0.33	12.79
Imprevistos y contingencias	0.79	39.18
Supervisión	0.48	9.97
Capacitación	0.40	3.63
Total	10.37	295.48

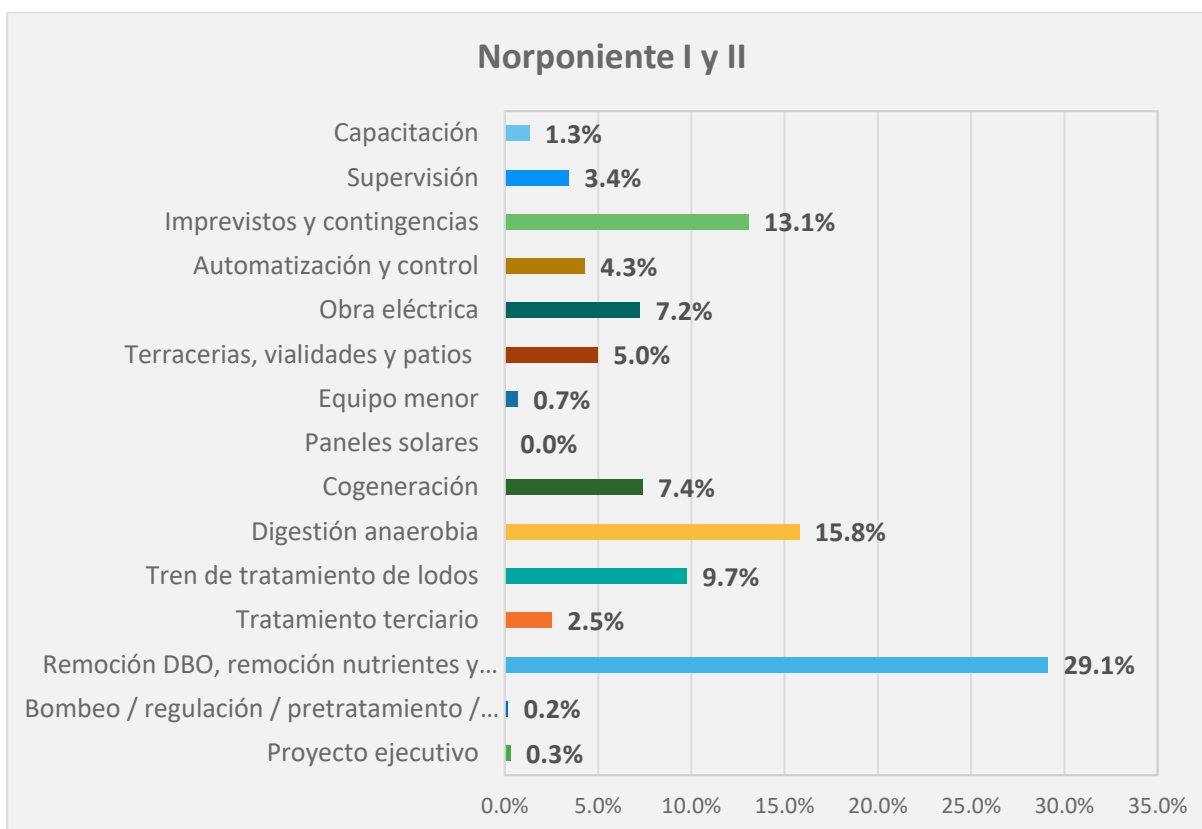


Figura 24 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

En la Tabla 18 se muestra el resumen del techo financiero total.

Tabla 18:
Monto de inversión, millones de pesos

PTAR	Capacidad instalada, L/s	Capacidad propuesta, L/s	Inversión requerida	Inversión Digestión Anaerobia	Inversión Cogeneración	Inversión Paneles solares	Inversión Total	Inversión unitaria, k\$/lps
Norponiente I	200	200	10.4	--	--	--	10.4	52
Norponiente II		200	197.4	74.53	23.54	--	295.5	1,477

A continuación, se muestra la estimación detallada de costos, se describe la unidad de proceso, el factor de ajuste integrado y monto de inversión estimado, así como los porcentajes aplicados a las obras complementarias: vialidades, obra eléctrica, de control e instrumentación, imprevistos, proyecto ejecutivo, supervisión y capacitación.

Tabla 19:
Estimación detallada de costos PTAR Norponiente I

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tren de Tratamiento de Agua		
Pretratamiento mecánico		
Regulación agua cruda/pretratada		
Sedimentación primaria		
Caja distribuidora agua primaria		
Filtro biológico		
Biológico remoción DBO	1.22	3.06
Biológica remoción de fósforo	0.61	3.51
Biológico remoción nitrógeno		
Clarificación secundaria		
Recirculación y purga de lodo		
Filtración terciaria		
Desinfección		
Pozos de infiltración		
Tren de Tratamiento de Lodos		
Espesado		
Digestión aerobia		
Digestión anaerobia		
Tanque de lodo digerido		
Desaguado		
Cogeneración		
Subtotal		6.57
Equipo menor	8.0%	0.53
Terracerías, vialidades y patios	4.0%	0.26
Obra eléctrica	10.0%	0.66
Automatización y control	5.0%	0.33
Imprevistos y contingencias	12.0%	0.79
Proyecto ejecutivo		0.35
Supervisión		0.48
Capacitación		0.40
Total		10.37

Tabla 20:
Estimación detallada de costos PTAR Norponiente II

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tren de Tratamiento de Agua		
Pretratamiento mecánico		
Regulación agua cruda/pretratada		
Sedimentación primaria		0.51
Caja distribuidora agua primaria		
Filtro biológico		53.08
Biológico remoción DBO		
Biológica remoción de fósforo		
Biológico remoción nitrógeno		17.98
Clarificación secundaria		5.75
Recirculación y purga de lodo		7.68
Filtración terciaria		5.70
Desinfección		
Pozos de infiltración		
Tren de Tratamiento de Lodos		3.99
Espesado		
Digestión aerobia		48.29
Digestión anaerobia		1.09
Tanque de lodo digerido		24.73
Desaguado		22.53
Cogeneración		
Subtotal		191.32
Equipo menor		1.57
Terracerías, vialidades y patios		14.95
Obra eléctrica		21.49
Automatización y control		12.79
Imprevistos y contingencias		39.18
Proyecto ejecutivo		0.58
Supervisión		9.97
Capacitación		3.63
Total		295.48

A decorative graphic consisting of three wavy, horizontal lines in blue, green, and grey, located on the left side of the page above the section header.

4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el programa de inversiones necesarias por ejecutar para que la PTAR cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; este programa abarca del año 2023 al año 2027.

Este programa de inversiones es el resultado de las acciones propuestas para mejorar la calidad del agua tratada de las PTAR con capacidad de tratamiento igual o mayor a 100 l/s en el estado de Quintana Roo, así como el presupuesto derivado del plan de acciones. La programación de las inversiones se basa en las necesidades propias de cada planta considerando el objetivo principal, que es el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

El 5 de diciembre de 2022 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación los:

LINEAMIENTOS que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Los Lineamientos constan en total de veintitrés artículos, más un artículo transitorio, así como el denominado Anexo A: Instructivo para la Información Requerida en el Sistema.

Los Lineamientos están estructurados en seis capítulos:

- + Capítulo Primero, Disposiciones Generales
- + Capítulo Segundo, Requisitos para la Presentación y Registro de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Tercero, De los Plazos de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Cuarto, Procedimiento para la presentación, registro y revisión de los Programas para el Cumplimiento, así como del Informe de Avances
- + Capítulo Quinto, De las Verificaciones
- + Capítulo Sexto, De las Sanciones

Aspectos Clave de los Lineamientos

Artículo 2. Sujeto Regulado: El responsable de descargas de aguas residuales al que resulte aplicable la NOM-001-SEMARNAT-2021, quien podrá presentar sus Programas para el Cumplimiento ante la Comisión.

Artículo 5. La presentación del Programa para el Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, **es de naturaleza voluntaria**, por lo que, en caso de su incumplimiento, el responsable de la descarga de aguas residuales en cualquier cuerpo receptor propiedad de la nación, quedará sujeto a los plazos establecidos en la mencionada Norma Oficial Mexicana

Artículo 6. El Sujeto Regulado presentará su Programa para el Cumplimiento, en los siguientes supuestos:

- a) Cuando **deba modificar sus instalaciones** con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como el Apéndice Normativo de la NOM-001-SEMARNAT-2021, y que los ajustes y acciones que se deban ejecutar de acuerdo a los estudios realizados por dicho Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor, en el Artículo 2o Transitorio de la NOM, o bien,
- b) Que el Sujeto Regulado **deba modificar los procesos productivos de las actividades que generan la descarga de aguas residuales**, con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como al Apéndice Normativo y que dichas modificaciones, de acuerdo con los análisis o la evidencia del Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor.

Artículo 7. El Sujeto Regulado, en caso de presentar el Programa para el Cumplimiento lo hará por cada uno de los puntos autorizados en su Permiso de Descarga, y que, para cumplir con las disposiciones establecidas en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se ubiquen en alguno de los supuestos establecidos en el Artículo 6 de los Lineamientos.

Artículo 8. Una vez registrado el Programa para el Cumplimiento, y en tanto este se encuentre vigente, en concordancia con el Artículo 5º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, el Sujeto Regulado deberá cumplir, además de lo comprometido en el Programa, con los límites y parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, para gozar de los beneficios e incentivos que para tales efectos establezca la LFD vigente.

Artículo 10. El Programa para el Cumplimiento, contendrá:

- + Nombre, denominación o razón social del Sujeto Regulado;
- + RFC del Sujeto Regulado;
- + Datos de identificación del Permiso de Descarga; Volumen de descarga; Datos del medidor o dispositivo de medición de las aguas residuales descargadas; Coordenadas del punto de descarga;
- + Datos generales del representante legal; Correo electrónico;
- + Justificación de la solicitud para la aplicación del Programa para el Cumplimiento;
- + Cronograma de actividades para las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento; Periodo solicitado;
- + E-Firma del Sujeto Regulado o representante legal.

Artículo 12. Los Programas para el Cumplimiento deberán presentarse ante la CONAGUA, por el Sujeto Regulado **a partir de que entre en vigor la NOM-001-SEMARNAT-2021 y hasta el 3 de abril del 2023.**

El Sujeto Regulado que no presente su Programa para el Cumplimiento en el periodo señalado, se sujetará a los plazos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 13. Los plazos que se establezcan en el Cronograma de Actividades para el seguimiento de las acciones comprometidas en los Programas para el Cumplimiento **no deberán rebasar el 11 de marzo de 2027.**

Artículo 15. La CONAGUA realizará revisiones aleatorias a los Programas para el Cumplimiento, podrá solicitar al Sujeto Regulado, las aclaraciones o información adicional que considere necesarias. En el supuesto de que el Sujeto Regulado no atienda el requerimiento de información dentro de los veinte días hábiles siguientes, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y será aplicable lo establecido en el Artículo 2º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 16. Una vez registrado el Programa ante la CONAGUA, no será objeto de modificación, salvo en el caso que el Sujeto Regulado justifique la necesidad de realizar algún cambio y no exceda el plazo originalmente establecido.

Artículo 17. El Sujeto Regulado debe presentar **dentro de los primeros cinco días hábiles de los meses de marzo y septiembre de cada año**, a partir de la fecha del registro, el avance de actividades mediante la carga de información que solicite el Sistema de Gestión en el apartado correspondiente al Informe de Avance del Programa para el Cumplimiento. Cuando el Sujeto Regulado no envíe en tiempo y forma la información del Informe de Avance, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y se aplicarán las disposiciones de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 21. La CONAGUA procederá a cancelar el Programa para el Cumplimiento y su registro, cuando compruebe que el Sujeto Regulado no ha cumplido con lo comprometido en el programa registrado. La CONAGUA, procederá a notificar la cancelación del Programa, por lo que quedarán sin efectos las acciones de cumplimiento propuestas por el Sujeto Regulado en su respectivo Programa, aplicándose las disposiciones correspondientes de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 22. Cuando las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento presentado impliquen la suspensión de sus procesos productivos y actividades para llevar a cabo las acciones tendientes a la conversión de procesos productivos o la instalación de maquinaria, equipos o plantas que se requieran para el cumplimiento de los parámetros y límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, y deba quedar fuera de operación el sistema de tratamiento de aguas residuales, el Sujeto Regulado deberá dar aviso a la CONAGUA, al menos 30 días hábiles antes de que esto ocurra, e indicar el periodo por el que prevalecerá dicha situación, el cual **no deberá exceder de tres meses**, y podrá presentarse **hasta un máximo de dos ocasiones** durante la vigencia del Programa.

De llevar a cabo la suspensión de sus procesos de tratamiento de aguas residuales sin el aviso correspondiente se aplicarán las sanciones previstas. Una vez recibida la solicitud, el Sistema de Gestión emitirá el comprobante que acreditará que la solicitud fue hecha en tiempo y forma.

Artículo 23. En caso de incumplimiento a los compromisos establecidos en el Programa para el Cumplimiento, quedan sin efecto las prerrogativas que ampara dicho documento, por lo cual el Sujeto Regulado será acreedor a las sanciones que correspondan y, en su caso, estará obligado a efectuar el pago de los derechos por el uso y aprovechamiento de cuerpos receptores de descargas de aguas residuales propiedad de la nación, a partir de la fecha del incumplimiento, así como de aquéllos que se hubieren generado con anterioridad, con sus accesorios, conforme a la LFD vigente.

Programa de inversión anual

Como se mencionó anteriormente, el monto de inversión total del Plan de Acciones es de 305.85 millones de pesos (mdp), inversión a realizarse en 5 años a partir del año 2023 hasta marzo del 2027, acorde al plazo previsto en los Lineamiento que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el presente apartado se muestra el desglose anual del Plan de Acciones, donde se describe el monto de inversión por año y unidad de proceso y/o componente del proyecto programado, así como los importes anuales y acumulados y su porcentaje de participación en la inversión.

Tabla 21:
Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado Norponiente I

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
A	Proyecto ejecutivo	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35
		100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
B	Cárcamo, regulación, pretratamiento, y/o tratamiento primario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
C	Tren de tratamiento de agua	6.57	0.00	0.00	0.00	0.00	6.57
		100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
D	Tratamiento terciario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
E	Tren de tratamiento de lodos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
F	Cogeneración (y/o paneles	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
	solares)	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
G	Equipo menor	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53
		100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
H	Terracerías, vialidades y patios	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26
		100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
I	Obra eléctrica	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66
		100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
J	Automatización	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33
		100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
K	Imprevistos y contingencias	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79
		100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	Total Anual y Gran total, mdp's	10.37	0.00	0.00	0.00	0.00	10.37
	Acumulado anual, mdp's	10.37	10.37	10.37	10.37	10.37	
	Total Anual y Gran total, %	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100%
	Acumulado anual, %	100.0%	100.0 %	100.0 %	100.0 %	100.0 %	

Tabla 22:
Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado Norponiente II

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
A	Proyecto ejecutivo	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58
		100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
B	Cárcamo, regulación, pretratamiento, y/o tratamiento primario	0.30	0.20	0.00	0.00	0.00	0.51
		60.0%	40.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
C	Tren de tratamiento de agua	49.51	33.00	0.00	0.00	0.00	82.51
		60.0%	40.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
D	Tratamiento terciario	0.00	7.68	0.00	0.00	0.00	7.68
		0.0%	100.0 %	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
E	Tren de tratamiento de lodos	23.43	54.67	0.00	0.00	0.00	78.09
		30.0%	70.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
F	Cogeneración (y/o paneles solares)	0.00	0.00	22.53	0.00	0.00	22.53
		0.0%	0.0%	100.0 %	0.0%	0.0%	100.0%
G	Equipo menor	0.60	0.78	0.18	0.00	0.00	1.57
		38.5%	49.8%	11.7%	0.0%	0.0%	100.0%
H	Terracerías, vialidades y patios	5.75	7.44	1.75	0.00	0.00	14.95
		38.5%	49.8%	11.7%	0.0%	0.0%	100.0%
I	Obra eléctrica	8.27	10.70	2.52	0.00	0.00	21.49

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
		38.5%	49.8%	11.7%	0.0%	0.0%	100.0%
J	Automatización	4.92	6.37	1.50	0.00	0.00	12.79
		38.5%	49.8%	11.7%	0.0%	0.0%	100.0%
K	Imprevistos y contingencias	15.07	19.51	4.60	0.00	0.00	39.18
		38.5%	49.8%	11.7%	0.0%	0.0%	100.0%
	Total Anual y Gran total, mdp's	112.27	147.13	36.08	0.00	0.00	295.48
	Acumulado anual, mdp's	112.27	259.40	295.48	295.48	295.48	
	Total Anual y Gran total, %	38.0%	49.8%	12.2%	0.0%	0.0%	100%
	Acumulado anual, %	38.0%	87.8%	100.0 %	100.0 %	100.0 %	

A continuación se muestra de manera gráfica el monto de inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR:

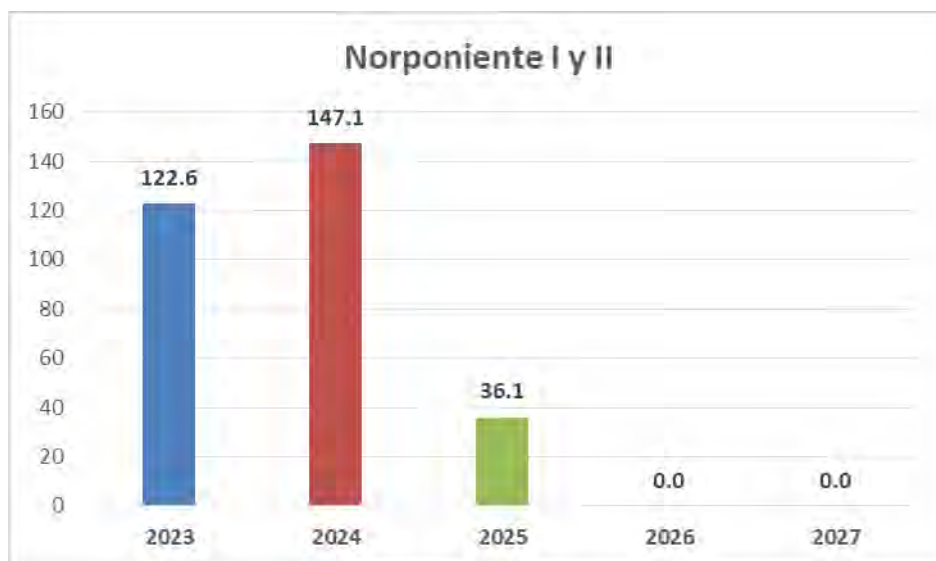


Figura 25 Inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR

Bibliografía

CONAGUA. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. . México: CONAGUA.

GIZ, C. A. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Mexico: GIZ.

Metcalf & Eddy / AECOM. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. NY: McGraw-Hill.

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4a ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.

US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Saas Tun Ha

Contenido

PTAR Saas Tun Há	1
Contenido	4
Índice de Tablas	5
Índice de Figuras.....	6
1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más	8
Descripción general de la PTAR Saas Tun Há	8
Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases	9
Descripción general del proceso	10
Diagrama de flujo de proceso	11
Descripción de las unidades de proceso	12
Tren de Tratamiento de Agua	12
Tren de Tratamiento de Lodos	19
Estado de conservación y operación de las instalaciones.....	24
Análisis de calidad del agua cruda.....	27
Calidad de agua cruda, histórica	27
Calidad de agua cruda, de este Estudio	28
Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada.....	31
Calidad de agua tratada, histórica.....	31
Calidad de agua tratada, de este Estudio.....	32
Parámetros de operación del reactor de lodos activados	35
Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua	

.....	37
Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR	38
Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) de cada planta	38
Estimación de los costos de operación y mantenimiento	40
Observaciones y recomendaciones generales	44
2 Plan de Acciones de las plantas con capacidad igual o mayor a 100 l.p.s. para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	45
3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	51
Techo financiero	51
Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales	53
Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares	57
Resumen de inversión, techo financiero	61
4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	65
Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	65
Aspectos Clave de los Lineamientos	66
Programa de inversión anual	69
Bibliografía.....	72

Índice de Tablas

Tabla 1: Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR Saas Tun Há	12
Tabla 2: Dimensiones Clarificador Secundario PTAR Saas Tun Há	13
Tabla 3: Dimensiones Tanque de Contacto de Cloro PTAR Saas Tun Ha	14
Tabla 4: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua.....	18

Tabla 5: Dimensiones de Digestor PTAR Saas Tun Há	19
Tabla 6: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo	22
Tabla 7: Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)	28
Tabla 8: Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente	30
Tabla 9: Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)	31
Tabla 10: Caracterización del agua tratada de este Estudio (<i>E.coli</i> y Huevos de helminto)	34
Tabla 11: Cumplimiento del agua tratada	34
Tabla 12: Oxígeno disuelto en reactor de lodos activados de la PTAR Saas Tun Há	35
Tabla 13: Sólidos sedimentables en reactores de la PTAR Saas Tun Há	36
Tabla 14: Ubicación de pozos de infiltración PTAR Saas Tun Há	37
Tabla 15: Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales	40
Tabla 16: Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M.	42
Tabla 17: Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Saas Tun Há	47
Tabla 18: Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Saas Tun Há	48
Tabla 19: Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio	52
Tabla 20: Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	61
Tabla 21: Monto de inversión, millones de pesos	62
Tabla 22: Estimación detallada de costos PTAR Sur	63
Tabla 23: Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado	69

Índice de Figuras

Figura 1 Vista Aérea PTAR Saas Tun Há	8
Figura 2 Diagrama de Flujo de Proceso Actual PTAR Saas Tun Há	11
Figura 3 Ingreso de Agua Cruda y Plataforma de Pretratamiento	15

Figura 4 Equipo Pretratamiento Ro5 y Plataforma de Pretratamiento	15
Figura 5 Reactor de Lodos Activados	15
Figura 6 Sopladores de Reactor de Lodos Activados	16
Figura 7 Clarificador Secundario y Caseta de Dosificación de Cloro	16
Figura 8 Tanque de Contacto de Cloro y Caseta de Dosificación de Cloro	16
Figura 9 Pozo de Infiltración y Agua Tratada	17
Figura 10 Digestor Aerobio de Lodos y Filtro Banda en Operación	20
Figura 11 Digestor Aerobio de Lodos y Caseta de Sopladores de digestión	21
Figura 12 Mesa de Espesado y Centrífuga de Lodos	21
Figura 13 Invernadero para Secado de Lodos y Volteador de Lodos	21
Figura 14 Caracterización del agua cruda (sep-2022)	30
Figura 15 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)	32
Figura 16 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)	33
Figura 17 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)	33
Figura 18 Pruebas de sedimentabilidad PTAR Saas Tun Há	36
Figura 19 Pozos de infiltración PTAR Saas Tun Há	37
Figura 20 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m ³	43
Figura 21 Vista actual de la PTAR Saas Tun Há	46
Figura 22 Diagrama de flujo de la PTAR Saas Tun Há con las acciones propuestas	50
Figura 23 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	62
Figura 24 Inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR	71

1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más

Descripción general de la PTAR Saas Tun Há

La PTAR Saas Tun Há se ubica en Playa del Carmen en el municipio de Solidaridad, y proporciona saneamiento a las aguas residuales domésticas de la mayor parte de la zona urbana de Playa del Carmen. Aguakan es responsable de la operación y mantenimiento de la PTAR, así como del fondeo y/o obtención de los recursos económicos requeridos para su ampliación, modernización, rehabilitación y sustitución de equipos. En la Figura 1 se presenta la vista general satelital de la PTAR Saas Tun Há. El agua tratada generada por la PTAR Saas Tun Há se manda directamente a infiltración, y no tiene actualmente destinos para su aprovechamiento como agua de reúso.



Figura 1 Vista Aérea PTAR Saas Tun Há

Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases

La PTAR Saas Tun Há se construyó en el año 2003 y tiene capacidad nominal para tratar un caudal promedio de 350 L/s. Inicialmente, la PTAR estuvo a cargo de la CAPA, aunque en el año 2015 se realizó su entrega a Aguakan para la operación. En 2021, el caudal promedio tratado fue de 234 L/s. La PTAR Saas Tun Há se encuentra en expansión y rehabilitación actualmente, por lo que algunas de las unidades mencionadas están prontas a ser sustituidas o no han entrado en operación:

Tren de tratamiento de agua:

- + Plataforma de Pretratamiento: Cribado grueso automático (1), Equipo de pretratamiento compacto Ro5 (2) compuesto de criba rotatoria, desarenador y desengrasador.
- + Filtro rociador (1), fuera de operación
- + Reactor de lodos activados con sección anóxica para remoción de nitrógeno (4)
- + Clarificación secundaria (3)
- + Tanque de contacto de cloro con cloro gas (1)
- + Pozos de infiltración de agua tratada (4)

Tren de tratamiento de lodo:

- + Mesa de espesado (instalada, no operativa) (1)
- + Digestión aerobia, aireación difusa (1)
- + Desaguado mecánico, en filtro banda (1)
- + Centrifuga de lodo (instalada, no operativa) (1)
- + Invernadero para secado de lodos con volteador (instalado, en pruebas de funcionamiento) (2)

Descripción general del proceso

La PTAR Saas Tun Há no cuenta con un cárcamo final dentro de sus instalaciones, en su lugar el agua entra directamente bombeada hacia la plataforma de pretratamiento elevado. El agua pasa por el pretratamiento, conformado por cribado grueso automático y después un equipo compacto Ro5 con criba rotatoria, desarenador y desengrasador. Este equipo es del mismo tipo de los instalados en las PTAR de la CAPA. La PTAR cuenta con un cárcamo de recepción de agua de pipas que recibe agua de los desazolves de alcantarillados o servicios de Aguakan.

Aunque la PTAR cuenta con un filtro rociador, esta unidad ya no está en servicio, en cambio, el agua pretratada entra a uno de los cuatro reactores de lodos. Los reactores están diseñados para la remoción de nitrógeno por nitrificación-desnitrificación, y cuentan con una sección preanóxica y una sección aerobia. Las secciones anóxicas, sin aireación, cuentan con agitadores sumergibles para mantener la biomasa suspendida. Adicionalmente, cada reactor cuenta con bombas para recircular internamente agua del final del reactor, en la zona aerobia, a la zona anóxica, al inicio.

El licor mezclado pasa a alguno de los tres clarificadores secundarios en operación. El retorno de lodo se realiza con dos cárcamos de bombeo conectados a los clarificadores. El agua clarificada se conduce hacia el tanque de contacto de cloro para su desinfección mediante cloro gas. El agua tratada se utiliza para abastecer los servicios de la PTAR y se dirige hacia alguno de los cuatro pozos de infiltración con que cuenta la planta.

El lodo secundario purgado se manda hacia el digestor aerobio. La aireación de esta unidad se realiza por aire difuso con burbuja gruesa. El digestor no cuenta con espesado de lodos previo, y tampoco se realiza dentro de la misma unidad como en otras locaciones, pero se encuentra instalada una mesa de espesado que entrará en operación a corto plazo. El lodo digerido es mandado a desaguado en filtro banda para posteriormente pasar a secado dentro del predio de la misma planta.

El desaguado con filtro banda se encuentra cercano a su sustitución por una centrífuga de lodos, ya instalada pero que está en etapa de pruebas. La PTAR cuenta con un amplio predio para la disposición y secado de lodos. Además, está en pruebas de funcionamiento un invernadero para el secado adicional de los lodos, equipado con equipos volteadores y ventilación.

Diagrama de flujo de proceso

Para facilitar la comprensión de los procesos, más adelante, la Figura 2 que muestra el diagrama de flujo simplificado del proceso actual de tratamiento de agua y lodos.

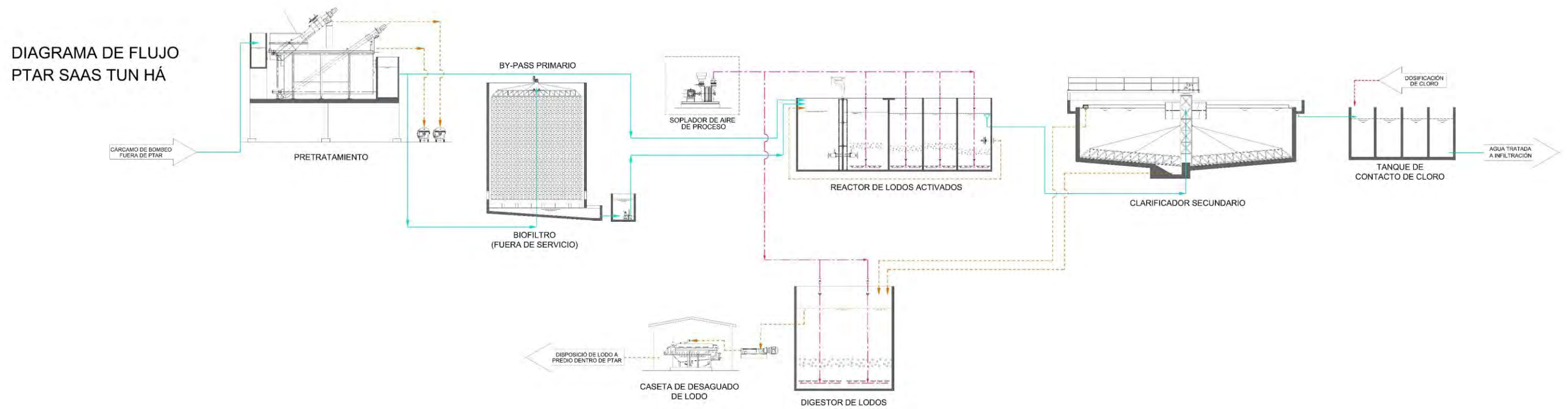


Figura 2 Diagrama de Flujo de Proceso Actual PTAR Saas Tun Há

Descripción de las unidades de proceso

Como parte del trabajo de campo elaborado en este Estudio, se recopiló información sobre la condición de operación y mantenimiento de las PTAR visitadas. Más adelante, se presenta esta información para la PTAR Saas Tun Há, dividido por unidad de tratamiento.

Tren de Tratamiento de Agua

Pretratamiento

El agua ingresa directamente a la plataforma de pretratamiento (Figura 3), por lo que la PTAR no cuenta con un cárcamo final. Esta unidad (Figura 4) se conforma de un canal con cribado grueso automático seguido de dos unidades compactas de pretratamiento Ro5. Estos equipos presentan las mismas dificultades que los instalados en las PTAR de la CAPA; el mecanismo de la criba rotatoria se obstruye con facilidad, además que se encuentra fuera de servicio el equipo de remoción de grasas, y se presenta acumulación de natas.

Reactores de lodos activados

El agua pretratada se distribuye por un vertedor a alguno de los cuatro reactores de lodos activados (Figura 5). Como se mencionó anteriormente, los reactores cuentan con aireación difusa y están diseñados para remover nitrógeno, por lo que cuentan con zonas anóxicas, aerobias y recirculación interna. Las zonas anóxicas de cada par de reactores cuentan con mezcladores de distintos tipos, uno de los pares está equipado con mezcladores sumergibles y el otro par de mezcladores tipo banana.

Los sopladores de proceso son tipo centrífugo multi etapa, cuentan con variador de frecuencia y operan usualmente 2 de los 5 equipos existentes. De acuerdo con el personal de la planta, no se han presentado problemas de operación debido a la eficiencia de los equipos, ni en mezcladores ni en la capacidad de aireación. Aunque debido a los cambios normativos y la calidad del agua influente, fue necesario aumentar la capacidad de recirculación interna para estar en posibilidad de cumplir con los objetivos de agua tratada. Las dimensiones de los reactores se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1:
Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR Saas Tun Há

Concepto	Unidad	Valor Reactor Saas Tun Há
Número de unidades	No.	4
Ancho	m	14.6

Concepto	Unidad	Valor Reactor Saas Tun Há
Largo zona anóxica	m	14.6
Largo zona aerobia	m	29.6
Tirante hidráulico	m	4.3
Volumen total	m ³	Anóxico 917 Aerobio 1,857

Clarificador secundario

La PTAR cuenta con tres clarificadores secundarios, cada clarificador tiene un diámetro distinto, como se distingue en la Figura 1, con el clarificador ubicado más al este de mayor diámetro y disminuyendo desde ahí. El clarificador 1 y más pequeño es el que se muestra en la Figura 7. Las natas secundarias de los clarificadores 1 y 2 se retornan al cárcamo de bombeo, mientras que las natas del clarificador 3 se mandan al digestor aerobio de lodos. Las dimensiones de ambos tipos de clarificadores se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2:
Dimensiones Clarificador Secundario PTAR Saas Tun Há

Concepto	Unidad	Clarificador pequeño	Clarificador mediano	Clarificador grande
Diámetro	m	27	31	33
Número de unidades	No.	1	1	1
Profundidad útil pared lateral	m	3.9	3.9	3.9
Área	m ²	573	755	855
Volumen total	m ³	2,233	2,944	3,336

De acuerdo con el personal de operación, no se presentan problemas de operación en la clarificación

secundaria. En el momento de la visita se encontraba una de las bombas de recirculación de lodo fuera de operación debido a mantenimiento preventivo rutinario. Este mantenimiento fue común también para algunos sopladores de proceso, y sopladores de digestión.

Desinfección

El agua efluente de cada clarificador se dirige hacia el tanque de contacto de cloro (Figura 8) para su desinfección con gas cloro. La caseta de dosificación es de tipo abierta (Figura 7 y Figura 8), y cuenta con detector de fugas de cloro, además de un kit B para el control de fugas. La dosificación de cloro se realiza mediante un clorinador colocado directamente a la salida del tanque de cloro. Los tanques presentan algo de óxido en su exterior, cuentan con báscula para registrar consumo y una grúa viajera.

Aunque no se reportan obstáculos o problemas de operación en esta unidad, la instalación de los tanques de cloro en esta manera representa un riesgo de trabajo. Sin embargo, el riesgo se ve disminuido por la presencia del sensor de cloro y el kit b para el control de fugas. El tanque de contacto de cloro presenta desprendimientos de concreto en los pasillos de operación, con lo que se observa expuesto el acero de repuesto. Es necesario efectuar mantenimiento general de la obra civil en esta unidad. Las dimensiones del tanque de contacto de cloro de muestran en la Tabla 3.

Tabla 3:
Dimensiones Tanque de Contacto de Cloro PTAR Saas Tun Ha

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	--	2
Volumen unitario	m ³	480
Canales	No.	16
Largo – ancho canal - tirante	m	6.0 – 1.25 – 4.0

Disposición y aprovechamiento de agua tratada

De cualquiera de los tanques de contacto de cloro el agua tratada se conduce a alguno de los cuatro pozos de infiltración (Figura 9). No existe aprovechamiento de agua para reúso por lo que toda el agua se dirige a infiltración. Además, cada pozo cuenta con un medidor de flujo para registrar el caudal ingresado a este.

Vista del tren de tratamiento de agua

De la Figura 3 a la Figura 9 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de agua de la PTAR.



Figura 3 Ingreso de Agua Cruda y Plataforma de Pretratamiento

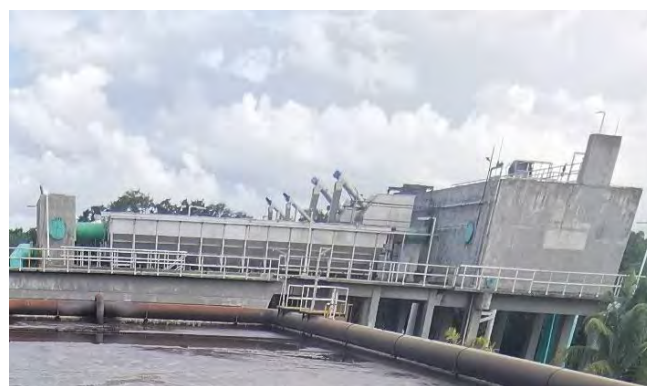


Figura 4 Equipo Pretratamiento Ro5 y Plataforma de Pretratamiento



Figura 5 Reactor de Lodos Activados



Figura 6 Sopladores de Reactor de Lodos Activados



Figura 7 Clarificador Secundario y Caseta de Dosificación de Cloro



Figura 8 Tanque de Contacto de Cloro y Caseta de Dosificación de Cloro



Figura 9 Pozo de Infiltración y Agua Tratada

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua

Con el fin de verificar que las principales estructuras de proceso del tren de tratamiento de agua sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes en el agua cruda, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para tal efecto se utilizaron las dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior, los datos de caudal y calidad de agua cruda utilizados son los siguientes:

- + Caudal medio de diseño 350 L/s
- + Calidad de agua cruda promedio (histórico)
 - DBO, 356 mg/L
 - SST, 282 mg/L

En la Tabla 4 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de agua, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR Saas Tun Há con las dimensiones de las estructuras, en caso de no contar con algún dato de operación se asignó un valor promedio del rango típico.

Los rangos de referencia utilizados aplican para procesos de lodos activados con remoción de nitrógeno.

Tabla 4:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Saas Tun Há
Reactor de Lodos Activados			
Concentración de SSTLM	mg/L	3,000 - 4,000	3,500
Fracción volátil		0.7 a 0.8	0.75
Relación F/M	kg/kg - d	0.2 a 0.6	0.37
Carga volumétrica	KgDBO/m ³ - d	0.3 a 1.6	0.97
Tiempo hidráulico de retención total	horas	5 a 15	8.8
Tiempo hidráulico de retención zona anóxica	horas	1 a 3	2.9
Tirante hidráulico	m	4.5 a 7.5	4.3
Clarificador Secundario			
Carga hidráulica superficial, Caudal medio	m ³ /m ² -d	16 a 28	13.9
Recirculación de lodo secundario	%	25 a 100%	100%
Recirculación interna	%	100 a 400%	
Carga de sólidos, Caudal medio	Kg/m ² - h	5 a 8	4.0
Tirante hidráulico	m	4 a 5	4.0
Tanque de contacto de cloro			
Tiempo hidráulico de retención	min	30	46

¹ Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + Los principales criterios de los reactores de lodos activados, clarificadores secundarios y tanque de contacto de cloro están dentro o muy cerca de los rangos típicos recomendados en la bibliografía especializada.

Tren de Tratamiento de Lodos

Digestor aerobio de lodos

La purga de lodo secundario se dirige hacia el digestor aerobio de lodos (Figura 10). El digestor opera con aireación difusa, y no cuenta con una operación de espesado previa. Debido a esto, y de acuerdo con el personal de operación, la baja concentración en los lodos del digestor representa un obstáculo para lograr la destrucción de sólidos suspendidos volátiles objetivo. Como medida a esto se instaló una mesa de espesado que está pronta a iniciar operaciones.

El digestor cuenta con aireación difusa. La instalación en general, obra civil y agitadores se encuentran en buen estado. En la Tabla 5 se presentan las dimensiones de esta unidad.

Tabla 5:
Dimensiones de Digestor PTAR Saas Tun Há

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	2
Largo	m	28
Ancho	m	14
Tirante hidráulico	m	5.5
Volumen total	m ³	4,312

Aledaño al digestor se localiza una caseta abierta que alberga a los sopladores que suministran el aire requerido para efectuar la digestión aerobia del lodo. Se cuenta con cuatro equipos tipo centrífugos multietapa.

Desaguado de lodo y Secado

El desaguado de lodo digerido se efectúa con un filtro banda de 2.0 m de ancho, en funcionamiento durante la visita (Figura 10). Aunque el equipo funciona correctamente, se requiere su cambio por uno de mayor tamaño o espesar el lodo previo a la digestión. La baja destrucción de sólidos y concentración de lodos del lodo digerido provocan una baja eficiencia en el desaguado de los lodos, que alcanza en promedio 16% de contenido de sólidos, cuando el objetivo es de 20%.

Como parte de las acciones de expansión, se construyó un nuevo digestor para satisfacer las necesidades de la planta. El digestor antiguo, ya en desuso, alberga el filtro banda en uso actualmente, mientras sobre el digestor nuevo, actualmente en operación, se encuentra la mesa de espesado y la centrífuga de lodos (Figura 12). Ambos equipos se encuentran en pruebas para entrar en operación pronto.

Adicionalmente, la PTAR cuenta con un patio de secado de lodos, que actualmente se usa para secado adicional los lodos desaguados. En pruebas operativas se encuentra también el invernadero de secado de lodos (Figura 13), con el que se espera llegar a concentraciones de lodo aún mayores a las que actualmente se llegan.

Vistas del tren de tratamiento de lodo

De la Figura 10 a la Figura 13 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de lodo de la PTAR.



Figura 10 Digestor Aerobio de Lodos y Filtro Banda en Operación



Figura 11 Digestor Aerobio de Lodos y Caseta de Sopladores de digestión



Figura 12 Mesa de Espesado y Centrífuga de Lodos



Figura 13 Invernadero para Secado de Lodos y Volteador de Lodos

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de lodo

Con el fin de verificar que las principales estructuras y equipos de proceso del tren de tratamiento de lodo sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño más relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para esta evaluación se consideraron las siguientes premisas de cálculo:

- + Dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior.
- + Producción de lodos, se estimó con base en la fórmula simplificada de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) con los datos de caudal medio de diseño y calidad de agua cruda promedio del histórico (SST y DBO), mismos que se utilizaron para la evaluación del tren de agua (US EPA, 1993).
- + Para determinar el volumen de lodos se utilizaron las concentraciones típicas esperadas en la purga de lodo secundario y purga de lodo primario con químicos.
- + De manera conservadora, se consideró que los equipos mecánicos de espesado y desaguado de lodo operan 5 días por semana 16 horas por día.
- + En la Tabla 6 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de lodo, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR Saas Tun Há con las dimensiones de las estructuras y capacidades de equipos, en caso de no contar con algún dato de operación se consideró un valor promedio del rango típico.

Tabla 6:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Saas Tun Há
Producción de lodo			
Producción de lodo esperada	kg SST /día	No aplica	8,682
Concentración		0.5 a 1.5%	0.7%
Flujo volumétrico	m ³ /día	No aplica	1,240
Digestión Aerobia de lodo			
Carga de sólidos volátiles	kgSSV/m ³ -d	1.6 a 4.8	1.5
Tiempo de retención hidráulico (edad	días	18 a 20	3.5

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Saas Tun Há
de lodo, 28°C)			
Destrucción esperada		38 a 50%	17%
Masa de lodo digerido estimada	kg SST /día		7,575
Desaguado de Lodo (filtro banda)			
Captura de sólidos	%	>95%	95%
Carga de sólidos (por metro)	kg/h	250 a 410	189
Carga hidráulica (por metro)	L/min	150 a 340	517

1 Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + Sin la operación de espesado, la edad de lodos en el digestor es muy baja (3.5) y no se logra la destrucción de SSV requerida para el cumplimiento de la NOM-004.
- + En cuanto al desaguado, la carga de sólidos en el filtro banda es adecuada, sin embargo, al no espesar el lodo el volumen de lodo digerido es muy alto por lo que el filtro banda opera con una carga hidráulica muy alta.
- + Las dos condiciones previas ocasionan que no se logre el porcentaje de sólidos requerido en el lodo desaguado.
- + Se requiere espesar el lodo al 4% para lograr una edad de lodos adecuada en el digestor y bajar la carga hidráulica en el equipo de desaguado.

Estado de conservación y operación de las instalaciones

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de agua de la PTAR Saas Tun Há, evaluadas con base en el cumplimiento de la NOM-001-2021 para suelo cárstico en DQO, SST, NT y PT con el promedio histórico de calidad de agua, se clasifican de **“Regulares a Buenas”**. En la sección **Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada**, se presenta la evaluación de dicha información.

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de lodos, determinadas con base en las condiciones operativas y de desempeño de las operaciones de espesado, digestión y desaguado observadas en la visita, se clasifican como **“Regular”**.

En términos generales las condiciones de mantenimiento de los trenes de tratamiento de agua y de lodos se consideran **“Regulares a buenas”**. En los párrafos subsecuentes se describe lo observado en la visita técnica efectuada a la PTAR.

La PTAR Saas Tun Há es una planta relativamente nueva, construida en 2003 e iniciada en operaciones en 2004, cuenta con 18 años de operación. El principal obstáculo que ha enfrentado la PTAR se debe al crecimiento de la zona urbana de Playa del Carmen a la que atiende, para lo que han sido necesarias mejoras al proceso y equipos. Al momento de la visita, gran parte de estas adecuaciones se encontraron ya ejecutadas o pronto a ejecutarse.

En seguimiento de las evaluaciones realizadas, para la PTAR Saas Tun Há, destacan los siguientes aspectos de proceso:

- + No cuenta con un proceso formal de remoción de fósforo, el cual es necesario por características del agua residual influente y el límite permisible establecido.
- + El desempeño de digestión no es el óptimo debido a la poca concentración de lodos en el tanque y la falta de un espesado. El espesado mecánico se encuentra en pruebas y pronto a operar.
- + El desempeño del desaguado no es el óptimo debido a la menor destrucción de sólidos suspendidos volátiles en la digestión, este problema se acarrea también a los lechos de secado de lodo donde se efectúa el secado adicional del lodo digerido desaguado.

En la visita de campo se observaron los siguientes aspectos relacionados con la condición de las instalaciones de la PTAR:

- + La PTAR Saas Tun Há, junto con la Sur y a futuro al PTAR Norponiente, forma parte de las plantas con un proceso formal de remoción de nitrógeno y con capacidad mayor a 100 L/s en Quintana Roo. Es de esperar que se requieran adecuaciones para lograr el nuevo límite permisible de 15 mg/L.
- + El filtro rociador existente se encuentra fuera de servicio, esto por razones de mejora de proceso y para poder completar la carga orgánica necesaria para efectuar la remoción biológica de nitrógeno.

- + El equipo pretratamiento compacto, no funciona con el desempeño esperado debido a fallas con diversas partes del equipo.
- + Cuenta con tres clarificadores secundarios de distintos tamaños, lo que aumenta la dificultad operación de esa zona y de los retornos de lodo.
- + Caseta de cloración abierta, aunque cuenta con medidas de seguridad como un sensor de cloro ambiental y un kit para la reparación de fugas.
- + Cuenta con un lecho de secado cubierto con equipo volteador, aunque sigue en pruebas operativas y no ha sido puesto en marcha, mientras tanto se continua con el secado en terreno abierto, con la ineficiencia que conlleva y la contaminación en el terreno y el subsuelo por lavado y arrastre durante las lluvias.
- + La losa en el tanque de contacto de cloro presenta desprendimientos leves de concreto y exposición del acero de refuerzo.

Con respecto al equipamiento mecánico se observa lo que a continuación se describe:

- + El equipo de pretratamiento compacto es el mismo que se encuentra instalado en las PTAR de la CAPA (Ro5), esto debido a que el organismo estuvo a cargo de esta PTAR hasta 2015. El equipo empieza a presentar los mismos problemas observados en las otras PTAR, con el sistema de remoción de grasas y cribado.
- + Condiciones adecuadas de operación y mantenimiento los equipos de bombeo de agua y lodos. De la misma manera con los sopladores de aire para proceso de lodos activados y digestión.
- + Las tuberías de conducción de agua, lodos y aire, así como soportes se encuentran en condiciones de mantenimiento adecuadas.
- + Se cuenta con un programa de mantenimiento preventivo de todos los equipos, lo que fortalece la seguridad del sistema para mantener la misma capacidad de tratamiento.
- + La mayoría de los equipos nuevos del tren de lodos siguen en pruebas operativas o no han sido entregados para su uso, y son esenciales para mejorar el desempeño del proceso. Estos comprenden la mesa espesadora de lodos, la centrífuga de lodos y el lecho de secado.

La obra e instalaciones eléctricas, como son la subestación, el Centro de Control de Motores, red de fuerza y alumbrado exterior se observan en condiciones adecuadas de mantenimiento. Gran parte de los equipos cuenta con protecciones, y los equipos de mayor potencia cuentan con variador de frecuencia.

A la fecha se cuenta con un plan de acciones propuestas para la renovación de la PTAR. Entre estos figuran la rehabilitación y mejora del pretratamiento, la construcción de un tanque regulador de agua cruda, la construcción de un sedimentador primario y un espesador de lodo gravitacional para los lodos de esta unidad.

Con el proyecto ejecutivo se complementarán estas acciones para asegurar el cumplimiento de los objetivos de calidad de la NOM-001-SEMARNAT-2021. La dirección de Aguakan manifestó tener programado iniciar el proyecto ejecutivo en el 2023 para iniciar obras en 2024.

En el Anexo 1 (Ficha de la PTAR) se presenta la descripción detallada de las características y condiciones actuales de operación y mantenimiento de las estructuras y equipos del tren de agua y lodos.

Análisis de calidad del agua cruda

Calidad de agua cruda, histórica

Se incluyen diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos, la información fue proporcionada por Aguakan, los análisis fueron efectuados por el laboratorio interno del organismo operador. Los datos de calidad de agua cruda y tratada proporcionados por el organismo operador se encuentran en el apartado Bases de Datos.

Los parámetros incluidos en las bases de datos de Aguakan son los siguientes:

- + Temperatura
- + pH: Potencial de hidrógeno
- + Conductividad
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos sedimentables
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Sólidos suspendidos volátiles (SSV)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂) (efluente)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃) (efluente)
- + Nitrógeno amoniacal (N-NH₃)
- + Nitrógeno total (NT) (efluente)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)
- + Coliformes fecales
- + Cloro residual libre
- + Transmitancia (efluente)
- + Absorbancia (efluente)

Debido a que los resultados de los muestreos fueron previos a la actualización de la NOM-001-SEMARNAT-2021, las bases de datos no incluyen los parámetros adicionales de la nueva norma, como color verdadero, toxicidad y *E. Coli*, así mismo incluyen parámetros que no son objeto de estudio en la actual norma, sin embargo, si permiten determinar la calidad de los procesos de tratamiento del agua residual.

Se proporcionaron datos de 196 muestreos efectuados en el influente durante el periodo del año 2020 al 2021 de tipo compuesto.

A continuación se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros analizados en el agua

cruda de la PTAR Saas Tun Há.

Tabla 7:
Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)

Concepto	Q prom. L/s	pH	SST mg/L	SSV mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	G & A mg/L	NTK mg/L	NT mg/L	PT mg/L
No. de datos	195	196	195	195	196	100	195	24	45	94
Mínimo	50.5	7.0	77	70	56	227	25.0	15.38	0.00	4.60
1° cuartil	103.8	7.2	180	136	300	663	35.8	54.75	38.13	8.72
Promedio	133.8	7.3	282	215	356	781	69.7	58.23	52.52	10.04
Mediana	133.3	7.3	227	176	341	758	58.0	60.38	56.02	9.56
3° cuartil	159.8	7.4	300	225	393	835	88.0	62.25	68.02	11.50
Máximo	342.8	7.7	2,820	2,240	1,230	2,055	303.0	75.00	88.99	17.10

Calidad de agua cruda, de este Estudio

Del 28 al 29 de septiembre se efectuó un muestreo compuesto de 24 horas tanto en el influente y efluente de la PTAR Saas Tun Há, este se efectuó con seis muestras simples, a cada una de estas se les realizaron los siguientes análisis de campo:

- + pH
- + Temperatura del agua
- + Cloro residual libre (efluente)

Los parámetros analizados en el laboratorio fueron los siguientes:

- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)

- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)
- + Escherichia coli (efluente)
- + Toxicidad Vibrio fischeri (efluente)
- + Huevos de helminto
- + Color verdadero (UV-Vis) a 436, 525 y 620 nm

Las actividades de colecta, preservación y análisis de las muestras fueron realizadas por personal de Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis (Intertek + ABC Analytic), éste cuenta con la acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA) en la rama de agua número AG-096-029/11 para su laboratorio ubicado en la ciudad de México y AG-096-029/11_S1 para el laboratorio de Mérida, donde se realizarán los análisis.

En todos los casos, la preservación y el almacenamiento de las muestras se efectuaron de acuerdo con los lineamientos que establece la normatividad mexicana. Las muestras colectadas fueron preservadas con hielo a una temperatura de 4°C con la intención de que no se degradaran, y fueron transportadas en una hielera al laboratorio correspondiente para su análisis.

El transporte se hizo con sumo cuidado, de tal forma que se evitaron los derrames y/o contaminación de muestras debido a rupturas de frascos o cualquier otro accidente.

Los diferentes frascos que integran las muestras se preservaron con los reactivos señalados en la normatividad.

En la Figura 14 se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Saas Tun Há. En el Anexo 3 se presentan los resultados completos del laboratorio del influente y efluente de la PTAR Saas Tun Há.

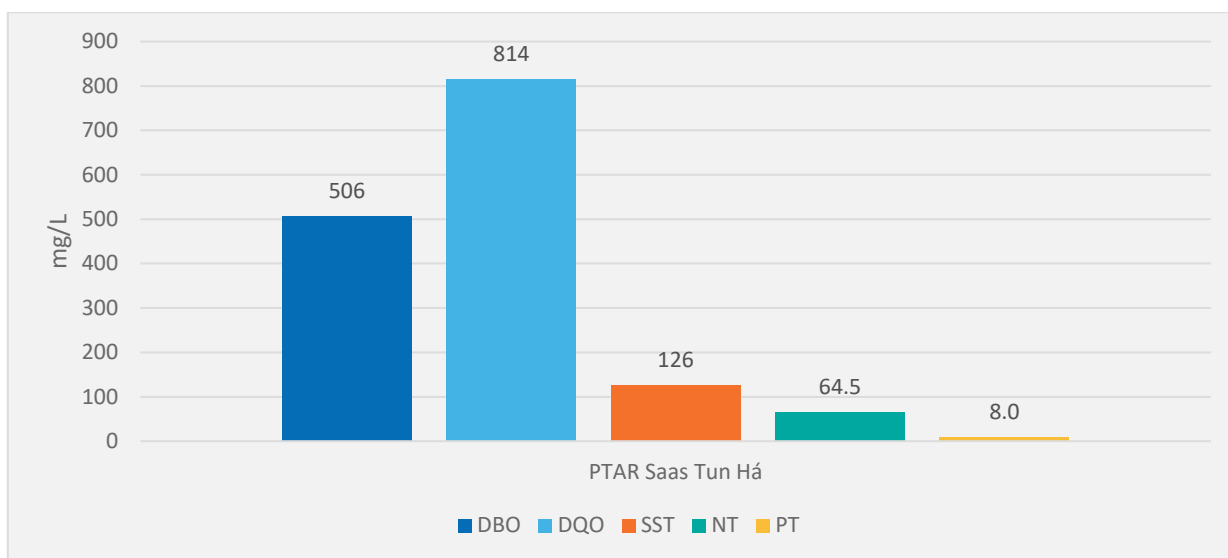


Figura 14 Caracterización del agua cruda (sep-2022)

Con la finalidad de conocer la relación de contaminantes, se realizaron los cálculos que a continuación se presentan en la siguiente tabla, los cuales fueron determinados con los promedios obtenidos anteriormente en la tabla y figura previas.

Tabla 8:
Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente

Relación	Promedio (2020-2021)	Valor Estudio 2022	Rango típico en Aguas Residuales Municipales ¹
DBO5/ DQO	0.46	0.62	0.45 – 0.55
SST/ DBO	0.79	0.25	0.80 – 1.20
SSV / SST	0.76	Sin dato	0.70 – 0.80
NTK/ DBO	0.16	0.13	0.10 – 0.20
Fósforo/ DBO	0.03	0.02	0.02

¹ (US EPA, 1993)

De las relaciones anteriores resalta SST/DBO de este Estudio, se obtuvo un valor muy bajo de SST.

Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada

En las siguientes figuras y tablas se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada del histórico de datos proporcionados por Aguakan y de los obtenidos en el presente Estudio, en estas se presentan los límites permisibles (LP) establecidos en la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelo cárstico.

Calidad de agua tratada, histórica

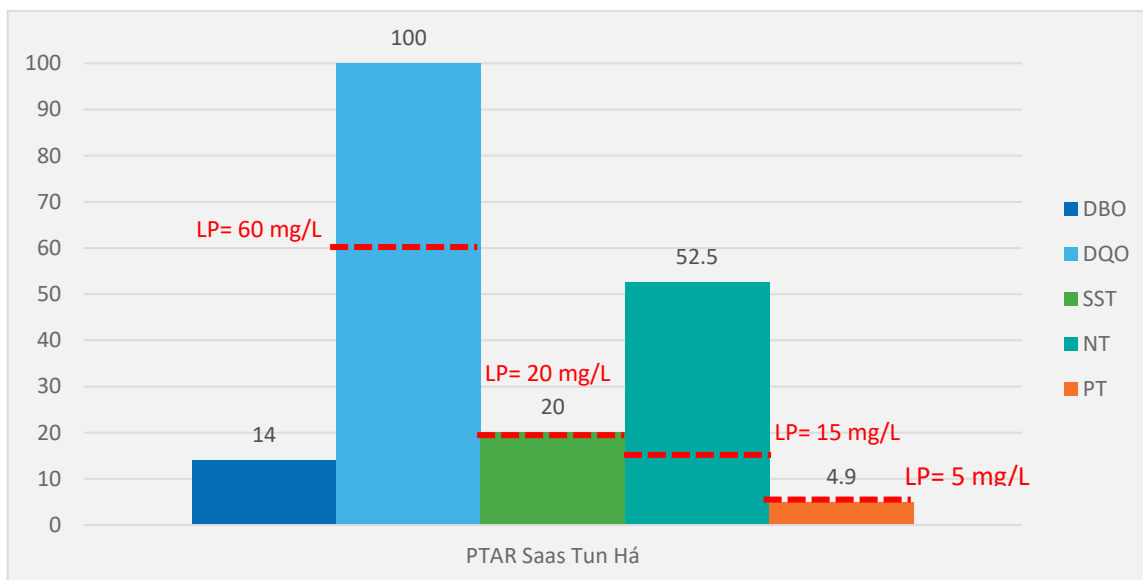
Se proporcionaron datos de 186 muestreos de tipo compuesto efectuados en el efluente durante el periodo del año 2020 al 2021.

En la siguiente tabla se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros en el agua tratada de la PTAR Saas Tun Há.

Tabla 9:
Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)

Concepto	Q prom. L/s	SST mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	G & A mg/L	NTK mg/L	NT mg/L	PT mg/L	Cl2 residual mg/L	Coliformes fecales (NMP, 100 mL)
No. De datos	195	186	95	186	24	42	94	91	91	85
Mínimo	50.5	5	1	20	1.0	23.25	0.00	0.26	0.00	1
1° cuartil	103.8	10	4	66	1.0	33.75	38.13	2.88	0.07	20
Promedio	133.8	20	14	100	5.2	42.96	52.52	4.86	0.26	1,740
Mediana	133.3	15	8	91	4.5	43.88	56.02	4.63	0.25	2,420
3° cuartil	159.8	24	17	118	8.0	50.06	68.02	6.27	0.41	2,420
Máximo	342.8	100	160	428	16.0	59.25	88.99	11.50	0.74	19,863

A manera de resumen en la Figura 15 se presentan los valores promedio de los principales parámetros del agua tratada de la PTAR Saas Tun Há, en esta se indican los límites permisibles (LP) para el promedio mensual en la NOM-001-2021.

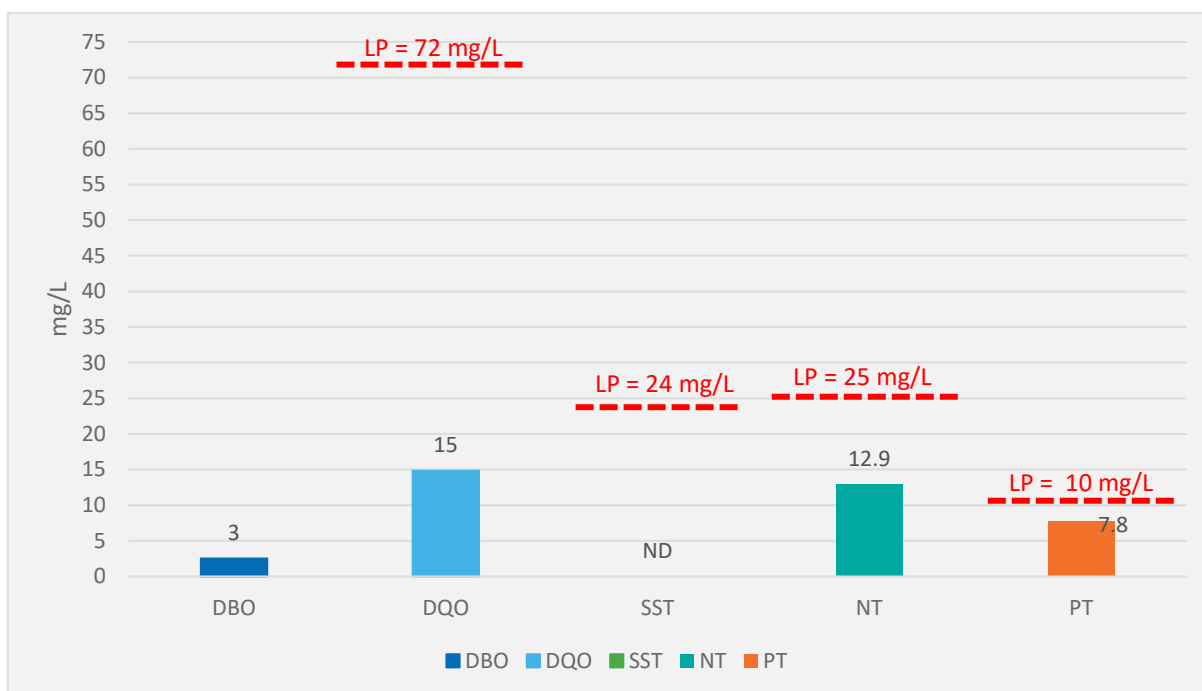


LP = Límite permisible

Figura 15 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)

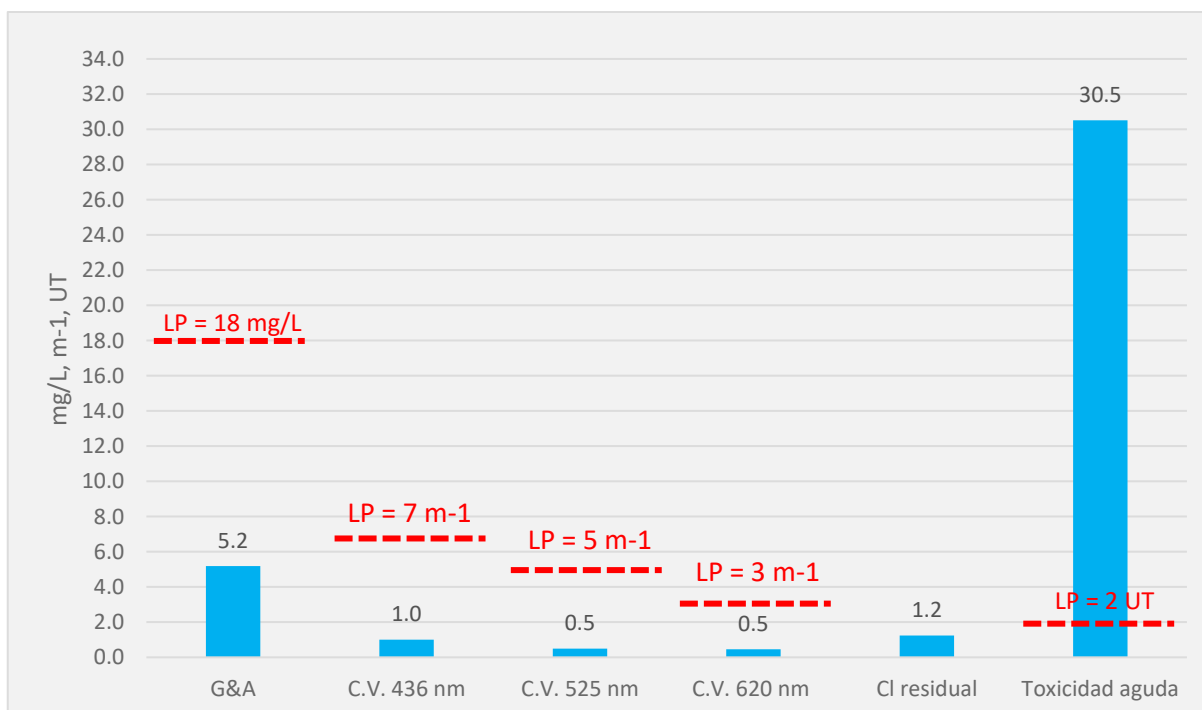
Calidad de agua tratada, de este Estudio

En la siguientes figuras y tabla se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada de la PTAR Saas Tun Há, en estas se indican los límites permisibles para el promedio diario en la NOM-001-2021.



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 16 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 17 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)

Tabla 10:
Caracterización del agua tratada de este Estudio (*E.coli* y Huevos de helminto)

Parámetro	Unidades	PTAR Saas Tun Há	Límite permisible NOM-001-2021
E.coli	NMP/100 mL	294	100
Huevos de helminto	HH/L	<0.2	1

Con la información histórica de calidad de agua tratada proporcionada por Aguakan y los resultados de los análisis efectuados se efectuó el análisis del cumplimiento de los principales parámetros de calidad del agua con respecto a la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021, para los valores de los datos históricos se utilizó el límite permisible del valor promedio mensual y para los resultados de los muestreos efectuados en este estudio se utilizó el límite permisible del valor promedio diario.

Tabla 11:
Cumplimiento del agua tratada

Parámetro	Valor promedio histórico (2020-2021) (mg/L)	Valor Estudio 2022 (mg/L)	Límite permisible NOM-001-2021	Cumple
SST	20	No detectado	PM = 20 (mg/L) PD = 24 (mg/L)	SI
DQO	100	15	PM = 60 (mg/L) PD = 72 (mg/L)	NO SI
Nitrógeno total	52.5	12.9	PM = 15 (mg/L) PD = 25 (mg/L)	NO SI
Fósforo total	4.9	7.8	PM = 5 (mg/L) PD = 10 (mg/L)	SI

Con respecto al color verdadero en las tres longitudes de onda se obtuvieron valores dentro del límite permisible, la concentración de *E. Coli* estuvo por encima del límite permisible así como la toxicidad, esta última debido a que la muestra se tomó después de la cloración y el cloro añade toxicidad al agua.

En la Evaluación de criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua se observa que el reactor está diseñado conforme los rangos típicos de lodos activados para remoción de nitrógeno, se esperaría que los resultados históricos de DQO y NT fueran menores a los obtenidos, posiblemente sea ocasionado por la política de operación de la planta la cual debe ser revisada y operada.

Parámetros de operación del reactor de lodos activados

Como parte de los trabajos de caracterización del agua cruda y tratada de la PTAR, también se incluyó la medición de los parámetros de operación de los reactores de lodos activados, oxígeno disuelto (OD) y sólidos sedimentables (SS).

El oxígeno disuelto se analizó en campo con un equipo portátil de la marca Hach. Los datos obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 12:
Oxígeno disuelto en reactor de lodos activados de la PTAR Saas Tun Há

Reactor	Oxígeno disuelto (mg/L)
R1	0.63
R2	0.48
R3	0.50
R4	0.49

El valor promedio de OD en los reactores es de 0.52 mg/L, el rango típico de operación es de 1 a 3 mg/L (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014), por lo cual se considera insuficiente.

Para determinar la concentración de SS en los reactores de la PTAR Saas Tun Há se efectuó una prueba de sedimentabilidad utilizando conos tipo imhoff, se tomó una muestra del licor mezclado de cada uno de los reactores y se dejó sedimentar por un tiempo de 30 minutos (ver Figura 18 y Tabla 13).



Figura 18 Pruebas de sedimentabilidad PTAR Saas Tun Há

Tabla 13:
Sólidos sedimentables en reactores de la PTAR Saas Tun Há

Reactor	Sólidos sedimentables (mL/L)
R1	750
R2	100
R3	800
R4	No cuantificado

El valor promedio resultante de SS en los tres reactores fue de 550 mL/L, con un índice volumétrico típico de 120 mL/g equivalen a 4.6 g/L, que es un valor un poco alto, el rango típico para este tipo de reactores es de 3 a 4 g/L (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014), la concentración en los reactores 1 y 3 es muy alta y la del reactor 2 es muy baja.

Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua

Como parte de las actividades realizadas en campo, se registraron las coordenadas de los pozos de infiltración de cada PTAR, utilizando un equipo GPS map 60Cx marca Garmin. En la Tabla 14 se presentan las coordenadas de localización de los pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR Saas Tun Há. Posteriormente, en la Figura 19 se presentan fotografías correspondientes al levantamiento de las coordenadas con GPS y de los registros o brocales de los pozos de infiltración.

Tabla 14:
Ubicación de pozos de infiltración PTAR Saas Tun Há

Concepto	Latitud	Longitud
Pozo de infiltración 1	20.68543	-87.1181
Pozo de infiltración 2	20.6854	-87.11835
Pozo de infiltración 3	20.68426	-87.1185
Pozo de infiltración 4	20.68437	-87.11842



Figura 19 Pozos de infiltración PTAR Saas Tun Há

Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR

Pendiente de incorporar, no se ha recibido la información por parte de Aguakan.

Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) de cada planta

De acuerdo a la información proporcionada por Aguakan, el costo total de O & M de la PTAR Saas Tun Há en el año 2021 fue de 21.42 millones de pesos (mdp's), desagregado de la siguiente forma:

+ Costo de operación:	17.37 mdp's
+ Costo de mantenimiento:	4.05 mdp's

Considerando que el caudal medio de agua tratada en el año 2021 fue de 234 L/s, que representa un volumen anual de 7,379,424 m³, el costo unitario de O & M es de 2.90 \$/m³ de agua tratada.

En relación a la energía eléctrica consumida en el proceso de tratamiento, la información proporcionada indica los siguientes valores anuales:

+ Consumo anual de energía:	2,966,796 kWh
+ Costo anual:	\$ 7,681,901

A partir de los valores previos se calcularon los siguientes indicadores:

+ Costo unitario de la energía.	2.59 \$/kWh
+ Consumo unitario de energía:	0.40 kWh/m ³
+ Costo energía respecto al costo O & M:	36 %

En la información de costo de O & M, así como la de consumo y costo de energía eléctrica se debe tener en cuenta que la PTAR Saas Tun Há tiene las siguientes particularidades, que inciden en el costo de operación y el consumo de energía:

- + La PTAR no tiene cárcamo de bombeo final
- + El tratamiento del agua consta sólo de proceso de lodos activados
- + El reactor incluye aereación y consumo de energía para remoción de Nitrógeno en la sección anóxica, con recirculación interna de licor mezclado

La remoción de Nitrógeno es parcial, la concentración promedio histórica del agua tratada es 52.5 mg/L, el efluente cumple con la calidad establecida en la NOM-001 previa y actual para DBO y SST.

Estimación de los costos de operación y mantenimiento

A efecto de comparar el costo de operación reportado por Aguakan contra un costo de referencia se procedió a estimar los costos anuales de un grupo de insumos relevantes:

- + Energía eléctrica,
- + Cloro para desinfección,
- + Polímero para espesado y/o desaguado de lodo,
- + Acarreo de lodo desaguado, y
- + Análisis de laboratorio de agua tratada y lodo para cumplimiento normativo y control de proceso
- + Personal de O & M

Para lo anterior, con base en un caudal medio de 234 L/s y la información de caudal y calidad de agua cruda y tratada proporcionada por el Organismo Operador se efectuó un balance de materia simplificado para establecer la masa de DBO removida, la generación de lodos en el tratamiento del agua, la remoción de sólidos suspendidos volátiles en el proceso de digestión y la masa de lodo desaguado a disposición.

Una vez definidos en el balance de materia los valores requeridos, a partir del caudal y calidad del agua cruda influente a la planta, se procedió a aplicar los factores de dosificación o consumo de los principales insumos (energía eléctrica, cloro polímero para espesado y/o polímero para desaguado) con base en las prácticas adecuadas de operación y, en el caso de los análisis de laboratorio de agua tratada y lodos, a partir de los requerimientos normativos.

En la Tabla 15 se presentan las consideraciones aplicadas para establecer el consumo de los insumos arriba indicados, así como el costo unitario asignado:

Tabla 15:
Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Energía eléctrica	Caudal medio de agua tratada y concentración promedio de DBO	2.08 kWh/kgDBO	2.50 \$/kWh
Cloro	Caudal medio de agua tratada	5.0 mg/L	20 \$/kg

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Polímero para espesado	Producción de lodo con base en caudal medio y concentración promedio de DBO y SST	4.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Polímero para desaguado	Fracción volátil del 75 % del lodo producido y remoción del 40 % de SSV en digestor	7.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Acarreo lodo desaguado, base húmeda	Lodo desaguado al 20 % de sólidos Masa de lodo en base seca/0.20	No aplica, secado adicional y almacenamiento en la propia PTAR	No aplica
Análisis laboratorio Agua tratada	NOM-001 población > 50 mil habitantes	2 muestreos/mes	8,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Lodo / biosólidos	NOM-004 Mayor de 1,500 hasta 15,000 (base seca)	2 muestreos/año	10,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Control de proceso	---	1 lote por mes	6,000 \$/mes

El costo del mantenimiento preventivo de la PTAR y los consumibles asociados a esa actividad se estimó aplicando el criterio de destinar un importe anual equivalente al 0.85 % del costo de inversión de la planta con sus actuales características. El costo de la planta se estableció a partir de un costo base de 750 mil pesos por litro – segundo de capacidad media instalada.

Para establecer el costo del personal de operación y mantenimiento se considera una plantilla “tipo” de doce personas, misma que se desagrega en las siguientes plazas: 1 Jefe de planta, 2 Supervisores de operación/mantenimiento, 5 operadores y 4 auxiliares de operación o mantenimiento.

Los sueldos considerados para establecer este rubro de costo están en el rango de 28,000 pesos mensuales para el Jefe de planta y de 12,000 pesos por mes para el auxiliar de operación, los sueldos del resto del personal están comprendidos dentro de este rango.

Los sueldos nominales se afectaron por un factor de 1.50 para incorporar el costo de las diversas prestaciones y seguridad social del personal. De esta forma se determinó un costo

total mensual de\$ 306, 000 por concepto de personal.

El factor unitario de consumo de energía eléctrica asignado permite establecer, además de la energía consumida por la planta, otros indicadores que en la PTAR Saas Tun Há tienen el siguiente valor:

- + Consumo unitario de energía: 0.79 kWh/m³
- + Potencia media de operación: 1,669 kilowatts

En la Tabla 16 se presentan los consumos e importes anuales de los rubros de costo establecidos, así como el costo unitario de cada rubro, al dividir su importe anual entre el volumen de agua tratada. Posteriormente, en la Figura se presenta de manera grafica el costo unitario desagregado por insumo.

Tabla 16:
Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M

Insumo	Consumo anual	Importe anual \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Energía eléctrica	5,848,046	14,620,115	1.98
Cloro	36,897	737,942	0.10
Polímero para espesado	10,228	1,534,182	0.21
Polímero para desaguado	14,319	2,147,855	0.29
Acarreo lodo desaguado	8,949	---	0.00
Análisis laboratorio		284,000	0.04
Mantenimiento		1,593,750	0.22
Personal de O & M		3,672,000	0.50
Total		24,589,845	3.33

Energía eléctrica consumo anual expresado en KWH; cloro, polímero para espesado y polímero

para desaguado, en kg; acarreo de lodo, en toneladas.

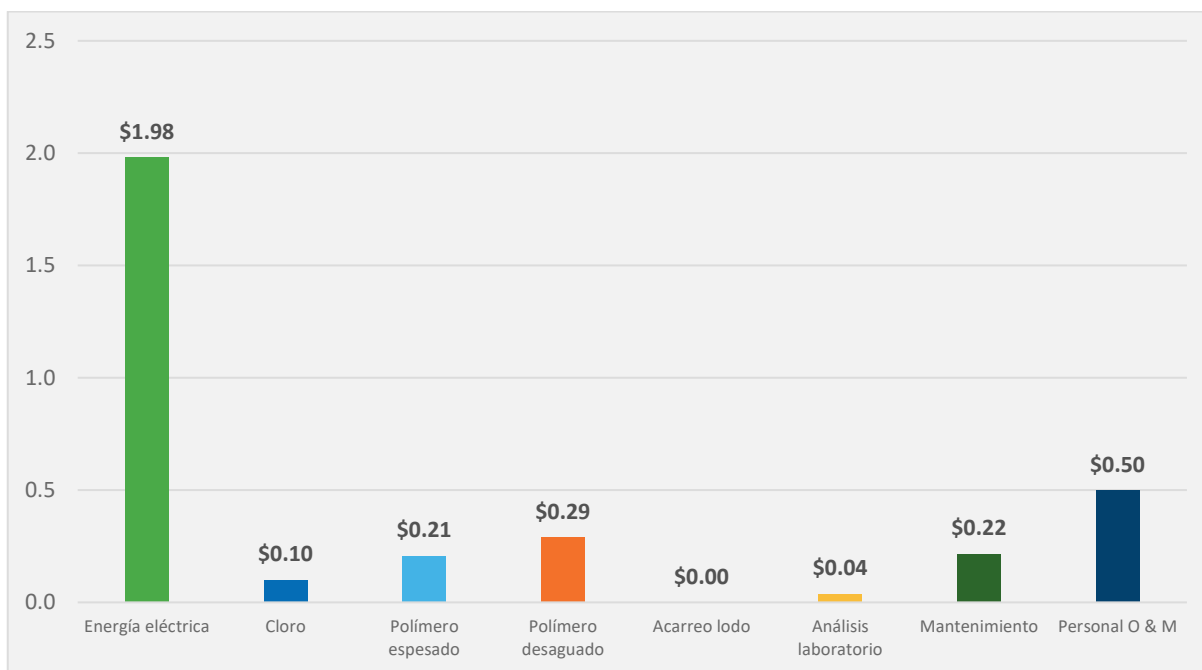


Figura 20 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m³

El importe anual de operación y mantenimiento estimado en esta sección es de 24.59 millones de pesos, con un costo unitario de O & M de 3.17 \$/m³ de agua tratada.

Al comparar el importe estimado anual de O & M con el importe reportado por Aguakan, de 21.42 millones de pesos, se tiene en el costo estimado un excedente de 3.17 mdp's con respecto al reportado, que representa $\approx 13\%$. La diferencia de costos se considera dentro de un margen razonable, dados los criterios y premisas generales con las que se estimó el costo de O & M de la PTAR Saas Tun Há.

Por lo antes expuesto, se considera que el costo de O & M reportado por Aguakan es adecuado y refleja las condiciones de operación y mantenimiento observadas en las visitas efectuadas a la planta, así como en la evaluación de la calidad de agua tratada producida.

Observaciones y recomendaciones generales

1. Incorporar tanque de regulación para el manejo de los picos de caudal de agua residual, sola o combinada con agua pluvial.
2. Se recomienda incorporar sedimentación primaria de alta tasa para reducir la carga en el reactor y por consiguiente reducir el costo de aireación, se debe habilitar by-pass de agua pretratada al reactor para controlar la relación DBO/NTK requerida para el proceso de denitrificación.
3. En caso de incluir la sedimentación primaria, será necesario incorporar espesador gravitacional de lodo primario y cárcamo de lodo y natas primarias.
4. Si bien la planta cuenta con remoción de nitrógeno, esta no fue diseñada para el límite establecido en la NOM-001-2021, por lo que será necesario incrementar el volumen anóxico y la recirculación interna, además de revisar la capacidad de aereación.
5. Se requiere incorporar tanque anaerobio para efectuar remoción biológica de fósforo.
6. Se recomienda incorporar una caja distribuidora de licor mezclado para repartir los caudales a los clarificadores secundarios acorde a su área y cargas superficiales para facilitar la operación de la PTAR.
7. Dadas las bajas concentraciones de oxígeno disuelto encontradas en los reactores de lodos activados durante la visita y las altas concentraciones de DQO y NT en el agua tratada se recomienda operar con cuatro sopladores, también es necesario revisar el caudal de recirculación interna para asegurar que se estén retornando los nitratos necesarios para reducir la concentración de nitrógeno total en el efluente.
8. Se recomienda operar los reactores de lodos activados entre 3,000 y 4,000 mg/L de SSLM.
9. En general se recomienda optimizar la operación de la PTAR, efectuando un análisis detallado de los parámetros de operación y calidad de agua cruda y tratada.
10. De existir potencial de reúso en la zona, será necesario incluir filtración terciaria.
11. Para mayor seguridad, es deseable modernizar el sistema de desinfección y habilitar caseta de cloración confinada.
12. Acelerar la puesta en operación de la mesa de espesado de lodo para mejorar la destrucción de SSV en el digestor y las características del lodo desaguado.
13. Acelerar la puesta en operación del patio cubierto de secado de lodos para evitar la contaminación ocasionada por el lavado de lodo que se almacena a la intemperie.

A decorative graphic consisting of three wavy lines in green, blue, and grey, positioned on the left side of the page.

2 Plan de Acciones de las plantas con capacidad igual o mayor a 100 l.p.s. para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Aguakan cuenta con proyecto ejecutivo elaborado en el 2018, con capacidad para caudal medio de 550 L/s y 990 L/s de caudal máximo. El proyecto se deberá actualizar acorde a los objetivos de calidad de agua tratada de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el Plan Maestro de la planta tiene previsto efectuar a mediano plazo el cambio de digestión aerobia de lodos por digestión anaerobia.

Las acciones que se proponen para la PTAR Saas Tun Há consideran que el caudal medio de diseño se mantiene sin cambio respecto al actual, que es de 350 litros por segundo.



Figura 21 Vista actual de la PTAR Saas Tun Há

En la Tabla 17 se presenta el resumen de las acciones propuestas para que la planta pueda cumplir con las especificaciones y límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para las descargas a suelo cárstico.

Tabla 17:
Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Saas Tun Há

Etapa de Tratamiento	Saas Tun Há
TREN DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	Existente
Regulación agua cruda/pretratada	Se incorpora
Sedimentación primaria	Se incorpora
Filtro biológico	Existente, no opera
Biológico remoción DBO	Existente
Biológico remoción de fósforo	Se incorpora
Biológico remoción nitrógeno	Existente, mejoramiento
Filtración terciaria	No aplica
Desinfección	Cloro gas existente, mejoramiento (UV a mediano plazo)
TREN DE LODO	
Espesado	Existente, mejoramiento
Digestión aerobia	Existente, mejoramiento
Digestión anaerobia	Futuro, a mediano plazo
Desaguado	Existente

En la Tabla 18 se presenta la descripción y características de las acciones propuestas de rehabilitación, mejoramiento o incorporación de etapas y/o equipos para la PTAR Saas Tun Há.

Tabla 18:
Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Saas Tun Há

Etapas de tratamiento	Saas Tun Há
TREN DE AGUA	
Pretratamiento	1. Incorporar tanque de regulación para excedentes de agua residual > caudal máximo
Tratamiento Primario	1. Incorporar sedimentación primaria de alta tasa • Con by pass de agua pretratada al reactor
Tratamiento Secundario	1. Incorporar tanque anaerobio para remoción biológica de fósforo 2. Incrementar volumen de la sección anóxica existente, acoplado al volumen de la nueva sección anaerobia 3. Incrementar capacidad del sistema de recirculación interna (para 350 L/s) 4. Revisar la capacidad del sistema de aereación (para 350 L/s)
Clarificación Secundaria	1. Incorporar cuarto clarificador secundario, en caso de ampliar capacidad a 550 L/s
Tratamiento Terciario	1. Filtración terciaria, en caso de reúso de agua tratada.
Desinfección	1. Se utiliza la caseta de cloración y los tanques de contacto de cloro existentes 2. Se moderniza el sistema y se habilita caseta de cloración confinada
TREN DE LODO	
Espesamiento de lodos	1. Incorporar espesador gravitacional de lodo primario y cárcamo de lodo y natas primarias 1. Poner en operación continua las dos mesas espesadoras existentes para WAS (en caso de ampliar capacidad a 550 L/s)

Etapa de tratamiento	Saas Tun Há
Digestión de lodos	1. Aumentar la capacidad de aereación 2. Aumentar el diámetro del cabezal de aereación 3. Aumentar el número de difusores
Desaguado de lodos	1. Poner en operación continua los dos equipos existentes de desaguado: filtro banda y centrífuga, (en caso de ampliar capacidad a 550 L/s)
Secado adicional de lodo desaguado	1. Patio de secado solar tipo invernadero marca Huber, con control de humedad y “pala” giratoria móvil para aerear y mover el lodo, • Fuera de operación
TEMAS VARIOS	1. Incluir medición de flujo en las corrientes de agua y de lodo. 2. Incluir sensores en reactor de lodos activados y en agua clarificada; para fines de control de proceso, ahorro energético y monitoreo de calidad de agua tratada.

En la Figura 22 se presenta el diagrama de flujo del tren de tratamiento de agua y lodos de la PTAR Saas Tun Há incorporando las acciones propuestas para que la planta produzca agua tratada que cumpla con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas a suelo cárstico.

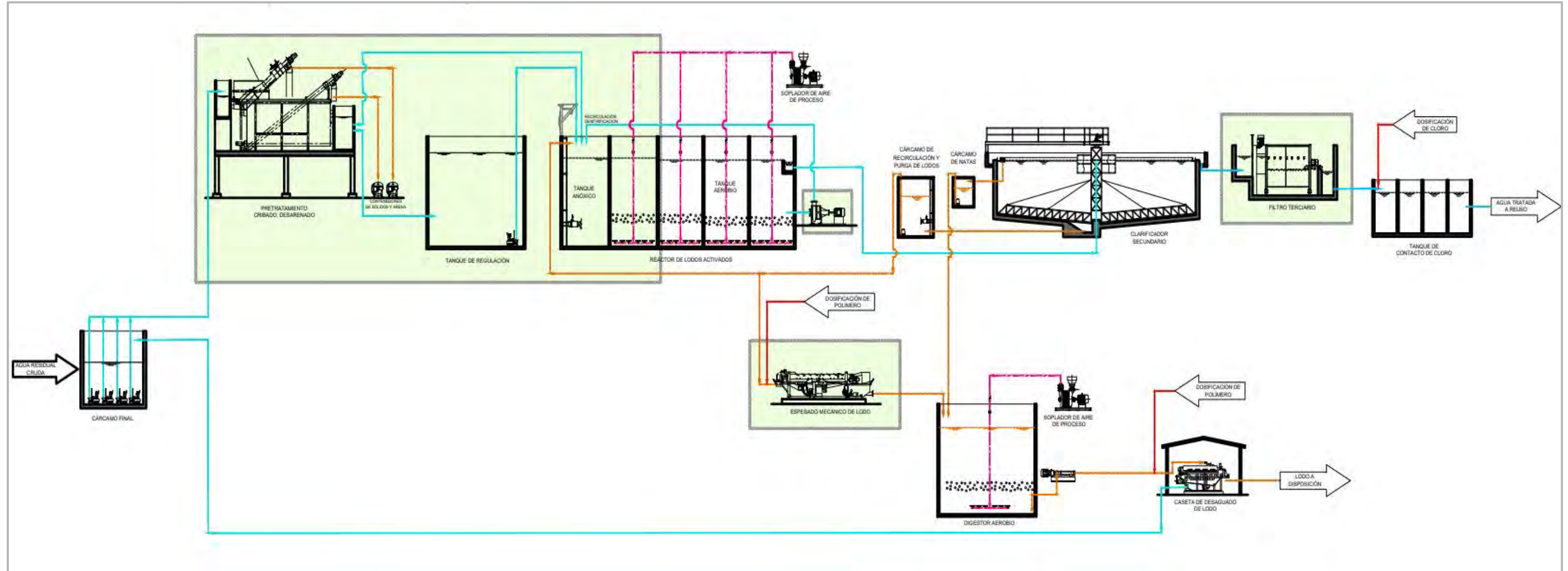


Figura 22 Diagrama de flujo de la PTAR Saas Tun Há con las acciones propuestas

A decorative graphic consisting of three wavy lines in blue, green, and grey, located on the left side of the page.

3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el procedimiento realizado para la estimación de costos de las acciones necesarias por ejecutar para que la PTAR Saas Tun Ha cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; en dicho presupuesto se incluye el costo de obra civil, electromecánica, eléctrica, instrumentación y control para obra nueva o ampliaciones, rehabilitación de obras existentes y proyecto ejecutivo y supervisión de obra y proyecto ejecutivo.

Las acciones de mejora surgen de la visita y diagnóstico técnico que se presenta previamente, así como de las entrevistas e información recabada con las áreas responsables de la operación y gestión de los recursos para saneamiento.

Techo financiero

El techo financiero para la implementación de las acciones de mejora y rehabilitación de la PTAR, se realizó a partir de costos paramétricos, como lo indican los Términos de Referencia.

Para lo anterior se recurrió a costos base de unidades de proceso y equipamiento similares y de capacidad comparable con las necesidades de las PTAR que forman parte de este estudio, de igual manera dichos costos son ajustados de acuerdo a la capacidad necesaria.

En la Tabla 19 se muestran los costos base por unidad de proceso, los cuales corresponden al costo de mercado establecido en proyectos realizados en el año 2021 y 2022 en Quintana Roo, en plantas de tratamiento con proceso de remoción biológica de nitrógeno y fósforo, así como equipamiento electromecánico y de proceso, tanto de tipo convencional como relativamente nuevo en la región, como es la filtración terciaria y la desinfección con lámparas ultravioleta.

Tabla 19:
Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio

Unidad de proceso	Costo base en MDP
Tren de Tratamiento de Agua	
Pretratamiento mecánico	20.97
Regulación agua cruda/pretratada	12.65
Sedimentación primaria	13.12
Caja distribuidora agua primaria	0.99
Filtro biológico	
Biológico remoción DBO	22.99
Biológico remoción de fósforo	2.50
Biológico remoción nitrógeno	5.75
Clarificación secundaria	14.80
Recirculación y purga de lodo	6.89
Filtración terciaria	12.12
Desinfección	10.49
Pozo de infiltración	1.60
Tren de Tratamiento de Lodo	
Espesado de lodo	7.79
Digestión aerobia	16.09
Digestión anaerobia	59.55
Tanque de lodo digerido	3.77
Desaguado de lodo	17.43
Cogeneración	18.81

Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con las acciones a realizar en la PTAR se estimaron los costos de inversión, esto de acuerdo con los costos base y el factor de ajuste, los cuales están relacionado con el caudal de tratamiento.

A continuación se describe el procedimiento aplicado a cada planta de tratamiento (identificada como PTAR "n") para establecer el techo financiero preliminar de los recursos económicos requeridos para implementar el plan de acciones:

1. Los costos de referencia de las unidades de proceso se ajustaron a valores de noviembre de 2022 con el factor de actualización que resulta de dividir el INPC de noviembre entre el INPC del mes en que se originó el presupuesto.

A manera de ejemplo, a continuación se describe el procedimiento:

- Fecha del presupuesto de la unidad de proceso o PTAR de referencia: octubre de 2021.
- Valor del INPC en octubre de 2021: 115.561
- Valor del INPC de noviembre de 2022: 125.997
- Factor de actualización costo de referencia: $125.997/115.561 = 1.090$

2. El costo de referencia del proceso de digestión anaerobia y del sistema de cogeneración se determina con base en un digestor anaerobio con sistemas periféricos; tamizado de lodo, tratamiento lateral de la corriente de desaguado de lodo anaerobio; antorcha de quemado de biogás, gasómetro para almacenar el biogás generado, acondicionamiento de biogás; caseta de equipos de digestión y sistema de cogeneración.

En la siguiente tabla se presenta el desglose y capacidad de los componentes de las etapas de digestión anaerobia de lodos y del sistema de cogeneración:

Etapas de Digestión Anaerobia de Lodo

Concepto	Importe actualizado, mdp
Tamizado de lodo (capacidad para 5 L/s de lodo espesado al 5%)	1.22
Digestor anaerobio mesofílico (de 5 700 m ³)	43.25
Gasómetro de membrana y periféricos (de 1.000 m ³)	6.14
Quemador de biogás y periféricos (capacidad para 225 m ³ /h)	1.59

Concepto	Importe actualizado, mdp
Edificios operativos	2.71
Tratamiento lateral del agua retirada en desaguado de lodo	4.64
Subtotal	59.55
Obra eléctrica (12 % del subtotal)	7.44
Control (3 % del subtotal + obra eléctrica)	2.01
Contingencias (8 % del subtotal + obra eléctrica + control)	5.52
Total	74.53

Sistema de Cogeneración

Concepto	Importe actualizado, mdp
Sistema de tratamiento de biogás (capacidad para 225 m ³ /h) para remoción de humedad, impurezas y H ₂ S	7.10
Sistema integral de cogeneración (capacidad de 500 kW eléctricos)	11.72
Total	18.81

El costo actualizado de las unidades de proceso se ajustó posteriormente en función de la capacidad (a caudal medio) de las unidades de proceso de la PTAR "n", en relación con la capacidad de la PTAR de referencia, acorde a lo siguiente:

$$\text{Costo PTAR "n"} = \text{Costo PTAR de referencia} * ((\text{Tamaño PTAR "n"} / \text{Tamaño PTAR referencia})^{0.70})$$

La capacidad de la PTAR de referencia es para un caudal promedio de 150 L/s.

A manera de ejemplo, al utilizar la ecuación anterior, y considerando que la PTAR "n" es de 350 L/s de capacidad, se obtiene un multiplicador de 1.81, mismo que se aplica sobre el importe de las unidades de proceso de la PTAR de referencia.

De esta forma, en lugar de ajustar el costo de la PTAR "n" con una relación lineal entre el tamaño de ambas plantas (2.33), el criterio toma en cuenta que el costo unitario de inversión (\$ por L/s de capacidad) disminuye al aumentar el tamaño de la unidad de proceso y/o de la PTAR.

Este procedimiento de ajuste de costo se utilizó en las unidades de proceso cuyo dimensionamiento está determinado por la capacidad y carga hidráulica, como es el caso de las etapas que a continuación se indican:

- Pretratamiento (cribado y desarenación)
- Regulación y/o bombeo de agua cruda/pretratada
- Sedimentación primaria
- Caja distribuidora agua primaria
- Clarificación secundaria
- Recirculación y purga de lodo
- Filtración terciaria
- Desinfección
- Tanque de lodo digerido

Asimismo, el procedimiento de ajuste de costo descrito en este numeral también es aplicable en los procesos biológicos de tratamiento de agua y en las operaciones y procesos del tren de tratamiento de lodos, cuando en la PTAR "n" se presenta la condición de carga influente orgánica y de sólidos que se describe en el siguiente numeral.

3. El factor de ponderación arriba referido se utiliza de manera directa si la carga contaminante influente a la PTAR "n", expresada como la concentración promedio de la DBO y SST en el agua residual cruda, es comparable a la de ($\leq 20\%$) la PTAR de referencia.

La concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente a la PTAR de referencia es 350 mg/L.

Se considera que el agua residual influente a la PTAR "n" es comparable al agua residual de la PTAR de referencia, cuando la concentración promedio de DBO y SST está en el rango de $\pm 20\%$ a la concentración indicada en el párrafo previo.

4. A continuación se enlistan las operaciones y procesos del tren de tratamiento de agua y de lodos que, en caso de variación mayor al 20 % en la concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente, estarían sujetos a ajuste de costo adicional al ya aplicado en el numeral 3.
 - Filtro rociador
 - Reactor de lodos activados, remoción DBO
 - Reactor de lodos activados, remoción de fosforo
 - Reactor de lodos activados, remoción nitrógeno
 - Espesado de lodo
 - Digestión aerobia
 - Digestión anaerobia
 - Desaguado de lodo

En los casos en que la calidad del agua residual influente a la PTAR "n" tiene una variación superior al 20%, hacia arriba o hacia abajo, se procedió a aplicar un ajuste adicional al costo de inversión en las operaciones y procesos del listado inmediato previo.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual influente es $\approx 30\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.05 o 0.90, según corresponda.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual es $\approx 40\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.12 o 0.80, según corresponda.

5. Se aplicó un factor de ponderación para los casos en que la actividad propuesta no es una unidad de proceso nueva y completa, es decir que consiste en la rehabilitación, mejoramiento o complemento de capacidad de una etapa de proceso o unidad existente.

El valor del factor de ponderación asignado en estos casos está en el rango de 0.35 a 0.65, a criterio del especialista, en función del grado de intervención que se requiere para la unidad de proceso en cuestión.

En términos generales, los valores cercanos al límite inferior del rango se aplicaron cuando la acción implicaba rehabilitación civil única o principalmente; los valores cercanos al límite superior se aplicaron cuando la intervención implica también reequipamiento electromecánico.

6. Una vez establecido el importe de inversión por planta de las principales unidades del tren de tratamiento de agua y de lodos, para determinar el importe de otros componentes de la PTAR a dicho importe se aplicó un valor seleccionado de los rangos de porcentaje que a continuación se indican:

Equipo menor:	5 % a 8 %
Vialidades, patios y obras exteriores:	1 % a 5 %
Obra eléctrica:	10 % a 15 %
Automatización y control:	3 % a 5 %
Imprevistos y contingencias:	8 % a 12 %

7. El importe por elaboración del proyecto ejecutivo de las acciones propuestas por planta se determinó a partir de un porcentaje, en el rango del 1.2 % al 3.5 %, mismo que se aplicó sobre el importe total estimado.

8. El costo de la supervisión de la ejecución y puesta en marcha de las obras y equipamiento propuestas en el Plan de Acciones por planta, se estableció aplicando un porcentaje del 3.5 % sobre el importe total estimado, sin incluir los importes correspondientes al costo del proyecto ejecutivo y de capacitación.

Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares

La selección de la digestión anaerobia como proceso de tratamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, orientado a la generación de biogás para su aprovechamiento, o bien la opción de instalar paneles solares en estas plantas, ha sido justificada mediante criterios técnicos específicos. Estos criterios incluyen la capacidad operativa de las plantas, la disponibilidad de espacio físico y las propiedades de la carga orgánica influente. En particular, en el caso de las PTAR ubicadas en el Estado de Quintana Roo, el contexto local en que se encuentra cada planta cobra especial relevancia, dado que las condiciones geográficas, ambientales y de infraestructura turística pueden influir en la viabilidad y eficiencia de cada tecnología implementada.

Este análisis permite una decisión fundamentada, buscando optimizar tanto el rendimiento energético como el aprovechamiento sostenible de los recursos locales.

Antecedentes

Como parte del diagnóstico para el mejoramiento de las PTAR de Quintana Roo mayores a 100 L/s, la digestión anaerobia se considera en las siguientes PTAR:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur que recibe también los lodos de la PTAR Caribe
4. PTAR Saas Tun Ha (a futuro, mediano plazo)

Adicionalmente, la instalación de paneles solares se considera en las siguientes PTAR, de las cuales las primeras tres son instalaciones existentes:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur
4. PTAR El Rey
5. PTAR Saas Tun Ha
6. PTAR San Miguelito
7. PTAR Bicentenario
8. PTAR Centenario

Digestión Anaerobia y Cogeneración

La digestión anaerobia es un proceso biológico mediante el cual los lodos residuales se descomponen en ausencia de oxígeno, generando biogás. El biogás, compuesto principalmente de metano, puede ser aprovechado para producir electricidad y calor mediante sistemas de cogeneración. Además de reducir el volumen de lodos, la digestión anaerobia permite un manejo más eficiente de los residuos, mejorando la sostenibilidad de las plantas al aprovechar el potencial energético del metano.

Los principales aspectos considerados para proponer digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás en las PTAR se presentan en seguida. Todos fueron considerados en conjunto para cada planta.

Condiciones climáticas

La temperatura está relacionada con la velocidad de las reacciones químicas. En el diseño de la digestión anaerobia, la temperatura aumenta la velocidad de hidrólisis y de formación de metano, además disminuye el mínimo tiempo de retención requerido para llegar a una destrucción de sólidos aceptable (38 % en SSV).

Para un proceso mesofílico, que es el seleccionado para las PTAR de Quintana Roo, las temperaturas óptimas se encuentran entre los 30 y 38°C (Metcalf & Eddy, 2014), lo cual es fácilmente alcanzado en la región, con temperaturas de agua residual alrededor de los 30°C todo el año. El no requerir un sistema para control fino de la temperatura es una gran ventaja de toda la zona.

Carga orgánica influente

Se requiere mantener cierta carga orgánica para mantener el equilibrio entre los microorganismos que realizan la digestión anaerobia y mantener una producción de biogás constante. La carga orgánica alimentada al digestor proviene de la fracción de SSV en los lodos generados en el proceso primario y/o secundario y éstos a su vez dependen de las características del agua residual.

En general, la carga orgánica influente necesaria proviene de un análisis detallado del proceso para cada caso, sin embargo, existen lineamientos con reglas generales para anticipar este resultado. En el caso de las PTAR de Quintana Roo, se consideraron para digestión anaerobia las PTAR que en su operación actual o a capacidad plena, recibieran más de 300 L/s o carga orgánica igual o mayor a 7.5 ton DBO/d, esto de acuerdo con estudios técnicos realizados previamente por GIZ (GIZ México, 2017).

Toxicidad

La digestión anaerobia es un proceso sensible a variaciones de pH y puede verse afectada por la presencia de ciertas sustancias inhibitoras en las aguas residuales. Para la instalación de

una nueva PTAR, es fundamental realizar análisis previos para descartar la presencia de estos compuestos que puedan interferir en el proceso. En el presente caso, dado que las PTAR evaluadas ya están en operación, se ha verificado que en los sitios propuestos para la digestión anaerobia no se han registrado historiales de inhibiciones significativas al proceso biológico, lo que garantiza su viabilidad.

Volumen y tipo de lodos generados

Una de las principales ventajas de la digestión anaerobia es la generación de biogás, siendo más eficiente esta generación cuanto mayor es la carga orgánica en los sólidos alimentados. En los sitios propuestos, además de lodos secundarios, se procesan lodos primarios con alto contenido de SSV, lo que incrementa la generación de biogás. Las altas cargas orgánicas influentes a las plantas aseguran buena generación de sólidos, maximizando la eficiencia del sistema de digestión.

Disponibilidad de espacio

Los sitios con propuesta de digestión anaerobia fueron revisados para la disponibilidad de espacio para una unidad de digestión anaerobia junto con gasómetro e instalaciones de cogeneración y manejo de biogás.

Disponibilidad operativa

La digestión anaerobia es una unidad significativamente más compleja que las demás en el tren de tratamiento, lo que demanda mayor capacidad técnica y un personal operativo especializado para su correcta operación a lo largo de la vida útil de la PTAR. En las plantas propuestas, se considera que cuentan con el personal y la capacidad técnica necesarios para implementar y mantener este proceso de manera eficiente.

Viabilidad operativa

Con base en la calidad de agua, la temperatura, el caudal influente y el tipo de proceso, es posible estimar la cantidad de lodos producidos en cada PTAR. Los lodos producidos son la base para estimar el tamaño ideal del digester anaerobio. De acuerdo con la literatura (Metcalf & Eddy, 2014) el tiempo de retención recomendado para los lodos a 30°C es de 6 a 14 días y la carga orgánica puede variar entre los 1.6 y 4.8 kg SSV/m³ d.

A manera de ejemplo, con el volumen de 5,700 m³/d y a una carga de 2.4 kg SSV/ m³ d sería posible alimentar hasta 13.7 toneladas al día de lodo. Este flujo másico a una concentración de 3.5 % en sólidos tendría un tiempo de residencia de 14.6 días. La producción de lodo actual de las PTAR seleccionadas para digestión anaerobia varía entre 6.7 y 9.9 toneladas al día, y puede ser aún mayor de acuerdo con la capacidad de tratamiento de agua residual instalada. El volumen seleccionado considera este crecimiento además de las necesidades actuales.

Conclusiones para biogás y cogeneración

Los aspectos anteriores se analizaron y forman parte del análisis de costo presentado. En general en las PTAR seleccionadas es positiva la presencia de la digestión anaerobia. En resumen, para seleccionar las PTAR donde es viable instalar digestión anaerobia se consideró que:

1. La temperatura de la zona es favorable con 30°C.
2. La carga orgánica influente a las PTAR y/o el caudal se encuentran en el umbral de 7.5 ton/d de DBO o 300 L/s de caudal tratado.
3. Los procesos biológicos existentes no presentan obstáculos por sustancias inhibidoras.
4. La presencia de lodo primario favorece la producción de biogás.
5. Existe suficiente espacio para la instalación de las unidades respectivas.
6. Existe suficiente personal operativo y capacidad técnica para mantener la unidad funcionando eficientemente.
7. El volumen seleccionado como base para los costos cubre los rangos de operación actuales y futuros de cada PTAR.
8. En el balance económico, la producción y aprovechamiento del biogás es un instrumento importante para hacer viable la operación de las PTAR más grandes.

Generación de Energía Solar

A diferencia de la digestión anaerobia, la instalación de paneles solares es un proceso más sencillo y viable para prácticamente cualquier PTAR. El criterio principal para su implementación fue la disponibilidad de espacio en la planta y su tamaño, siendo seleccionadas aquellas de mediana o gran escala.

Las plantas que no tienen suficiente carga orgánica para justificar la digestión anaerobia, pero disponen de amplias áreas, pueden aprovechar los paneles solares para reducir su dependencia de la red eléctrica y generar energía renovable de manera sostenible. En consecuencia, esta tecnología se considera para casi todas las PTAR.

El costo de implementación de ambas tecnologías no es equivalente, siendo la digestión anaerobia considerablemente más costosa. Sin embargo, como se muestra en el análisis económico, la generación de biogás a escalas superiores al umbral establecido por la GIZ produce una cantidad significativa de energía eléctrica, generando importantes ahorros a largo plazo. Además, la digestión anaerobia requiere una mayor capacidad técnica para su operación. En contraste, los paneles solares, más sencillos de instalar y mantener, representan una opción accesible y conveniente para todas las PTAR.

A continuación se presenta una tabla resumen con los principales criterios utilizados para la selección de digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás, así como para la instalación de paneles solares.

			Principales Criterios para selección de Digestión Anaerobia					Criterio de selección para la instalación de Paneles Solares	
Nombre de la planta	Capacidad instalada (L/s)	DBO entrada (mg/L)	Carga orgánica influente (Ton DBO /día)	Carga orgánica > 7.5 ton / día	Sedimentación primaria (Lodo primario)	Disponibilidad operativa	Digestión Anaerobia	Espacio disponible	Paneles solares
Playa del Carmen 11 (Saas Tun Ha)	250	356	7.7	SI	SI, se incorpora	SI	Futuro, se incorpora a mediano	SI	SI

Resumen de inversión, techo financiero

En la Tabla 20 se muestra el monto de inversión por unidad de proceso o componente de proyecto, y en la Figura 23 se muestra su distribución porcentual.

Tabla 20:

Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Etapa o componente	Importe PTAR Saas Tun Ha, mdp's
Proyecto ejecutivo	1.50
Bombeo / regulación / pretratamiento / primario	38.72
Remoción DBO y nutrientes, desinfección	16.37
Tratamiento terciario	
Tren de tratamiento de lodos	13.18
Digestión anaerobia	
Cogeneración	
Paneles solares	11.34
Equipo menor	3.98
Terracerías, vialidades, patios	3.18
Obra eléctrica	7.96
Automatización y control	2.39
Imprevistos y contingencias	6.37
Supervisión	3.64
Capacitación	0.40
Total	109.03

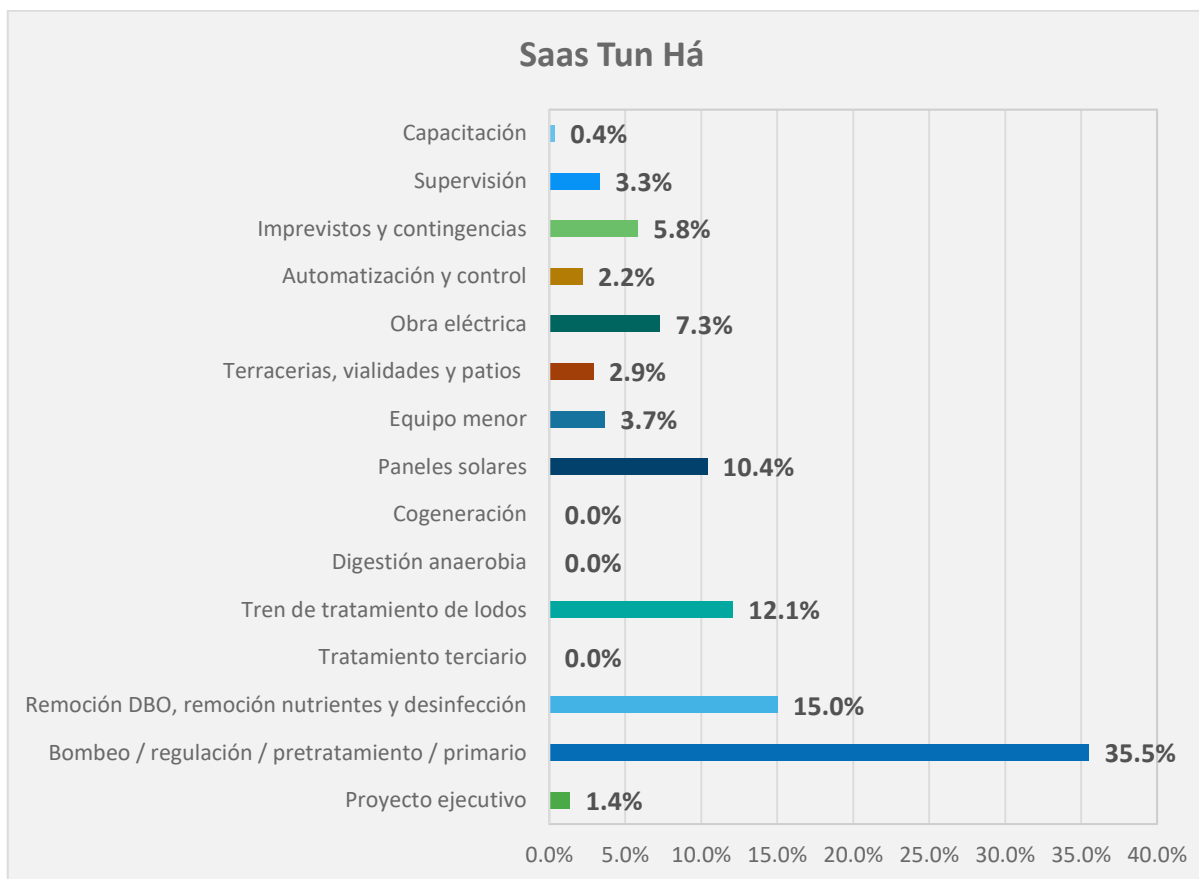


Figura 23 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

En la Tabla 21 se muestra el resumen del techo financiero total.

Tabla 21:
Monto de inversión, millones de pesos

PTAR	Capacidad instalada, L/s	Capacidad propuesta, L/s	Inversión requerida	Inversión Digestión Anaerobia	Inversión Cogeneración	Inversión Paneles solares	Inversión Total	Inversión unitaria, k\$/lps
Saas Tun Há	350	350	97.7	--	--	11.3	109.0	312

A continuación, se muestra la estimación detallada de costos, se describe la unidad de proceso, el factor de ajuste integrado y monto de inversión estimado, así como los porcentajes aplicados a las obras complementarias: vialidades, obra eléctrica, de control e

instrumentación, imprevistos, proyecto ejecutivo, supervisión y capacitación.

Tabla 22:
Estimación detallada de costos PTAR Sur

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tren de Tratamiento de Agua		
Pretratamiento mecánico		
Regulación agua cruda/pretratada	1.81	22.89
Sedimentación primaria	1.21	15.83
Caja distribuidora agua primaria		
Filtro biológico		
Biológico remoción DBO		
Biológica remoción de fósforo	1.81	4.53
Biológico remoción nitrógeno	0.90	5.20
Clarificación secundaria		
Recirculación y purga de lodo		
Filtración terciaria		
Desinfección	0.63	6.64
Pozos de infiltración		
Tren de Tratamiento de Lodo		
Espesado	0.8	6.23
Digestión aerobia	0.35	5.63
Digestión anaerobia		
Tanque de lodo digerido	0.35	1.32
Desaguado		
Cogeneración		
Paneles solares		11.34
Subtotal		79.61
Equipo menor	5.0%	3.98
Terracerías, vialidades y patios	4.0%	3.18
Obra eléctrica	10.0%	7.96
Automatización y control	3.0%	2.39

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Imprevistos y contingencias	8.0%	6.37
Proyecto ejecutivo		1.50
Supervisión		3.64
Capacitación		0.40
Total		109.03



4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el programa de inversiones necesarias por ejecutar para que la PTAR cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; este programa abarca del año 2023 al año 2027.

Este programa de inversiones es el resultado de las acciones propuestas para mejorar la calidad del agua tratada de las PTAR con capacidad de tratamiento igual o mayor a 100 l/s en el estado de Quintana Roo, así como el presupuesto derivado del plan de acciones. La programación de las inversiones se basa en las necesidades propias de cada planta considerando el objetivo principal, que es el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

El 5 de diciembre de 2022 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación los:

LINEAMIENTOS que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Los Lineamientos constan en total de veintitrés artículos, más un artículo transitorio, así como el denominado Anexo A: Instructivo para la Información Requerida en el Sistema.

Los Lineamientos están estructurados en seis capítulos:

- + Capítulo Primero, Disposiciones Generales
- + Capítulo Segundo, Requisitos para la Presentación y Registro de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Tercero, De los Plazos de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Cuarto, Procedimiento para la presentación, registro y revisión de los Programas para el Cumplimiento, así como del Informe de Avances
- + Capítulo Quinto, De las Verificaciones
- + Capítulo Sexto, De las Sanciones

Aspectos Clave de los Lineamientos

Artículo 2. Sujeto Regulado: El responsable de descargas de aguas residuales al que resulte aplicable la NOM-001-SEMARNAT-2021, quien podrá presentar sus Programas para el Cumplimiento ante la Comisión.

Artículo 5. La presentación del Programa para el Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, **es de naturaleza voluntaria**, por lo que, en caso de su incumplimiento, el responsable de la descarga de aguas residuales en cualquier cuerpo receptor propiedad de la nación, quedará sujeto a los plazos establecidos en la mencionada Norma Oficial Mexicana.

Artículo 6. El Sujeto Regulado presentará su Programa para el Cumplimiento, en los siguientes supuestos:

- a) Cuando **deba modificar sus instalaciones** con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como el Apéndice Normativo de la NOM-001-SEMARNAT-2021, y que los ajustes y acciones que se deban ejecutar de acuerdo a los estudios realizados por dicho Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor, en el Artículo 2o Transitorio de la NOM, o bien,
- b) Que el Sujeto Regulado **deba modificar los procesos productivos de las actividades que generan la descarga de aguas residuales**, con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como al Apéndice Normativo y que dichas modificaciones, de acuerdo con los análisis o la evidencia del Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor.

Artículo 7. El Sujeto Regulado, en caso de presentar el Programa para el Cumplimiento lo hará por cada uno de los puntos autorizados en su Permiso de Descarga, y que, para cumplir con las disposiciones establecidas en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se ubiquen en alguno de los supuestos establecidos en el Artículo 6 de los Lineamientos.

Artículo 8. Una vez registrado el Programa para el Cumplimiento, y en tanto este se encuentre

vigente, en concordancia con el Artículo 5º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, el Sujeto Regulado deberá cumplir, además de lo comprometido en el Programa, con los límites y parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, para gozar de los beneficios e incentivos que para tales efectos establezca la LFD vigente.

Artículo 10. El Programa para el Cumplimiento, contendrá:

- + Nombre, denominación o razón social del Sujeto Regulado;
- + RFC del Sujeto Regulado;
- + Datos de identificación del Permiso de Descarga; Volumen de descarga; Datos del medidor o dispositivo de medición de las aguas residuales descargadas; Coordenadas del punto de descarga;
- + Datos generales del representante legal; Correo electrónico;
- + Justificación de la solicitud para la aplicación del Programa para el Cumplimiento;
- + Cronograma de actividades para las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento; Periodo solicitado;
- + E-Firma del Sujeto Regulado o representante legal.

Artículo 12. Los Programas para el Cumplimiento deberán presentarse ante la CONAGUA, por el Sujeto Regulado **a partir de que entre en vigor la NOM-001-SEMARNAT-2021 y hasta el 3 de abril del 2023.**

El Sujeto Regulado que no presente su Programa para el Cumplimiento en el periodo señalado, se sujetará a los plazos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 13. Los plazos que se establezcan en el Cronograma de Actividades para el seguimiento de las acciones comprometidas en los Programas para el Cumplimiento **no deberán rebasar el 11 de marzo de 2027.**

Artículo 15. La CONAGUA realizará revisiones aleatorias a los Programas para el Cumplimiento, podrá solicitar al Sujeto Regulado, las aclaraciones o información adicional que considere necesarias. En el supuesto de que el Sujeto Regulado no atienda el requerimiento de información dentro de los veinte días hábiles siguientes, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y será aplicable lo establecido en el Artículo 2º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 16. Una vez registrado el Programa ante la CONAGUA, no será objeto de modificación, salvo en el caso que el Sujeto Regulado justifique la necesidad de realizar algún cambio y no exceda el plazo originalmente establecido.

Artículo 17. El Sujeto Regulado debe presentar **dentro de los primeros cinco días hábiles de los meses de marzo y septiembre de cada año**, a partir de la fecha del registro, el avance de actividades mediante la carga de información que solicite el Sistema de Gestión en el apartado correspondiente al Informe de Avance del Programa para el Cumplimiento. Cuando el Sujeto Regulado no envíe en tiempo y forma la información del Informe de Avance, el Programa para

el Cumplimiento quedará sin efecto y se aplicarán las disposiciones de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 21. La CONAGUA procederá a cancelar el Programa para el Cumplimiento y su registro, cuando compruebe que el Sujeto Regulado no ha cumplido con lo comprometido en el programa registrado. La CONAGUA, procederá a notificar la cancelación del Programa, por lo que quedarán sin efectos las acciones de cumplimiento propuestas por el Sujeto Regulado en su respectivo Programa, aplicándose las disposiciones correspondientes de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 22. Cuando las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento presentado impliquen la suspensión de sus procesos productivos y actividades para llevar a cabo las acciones tendientes a la conversión de procesos productivos o la instalación de maquinaria, equipos o plantas que se requieran para el cumplimiento de los parámetros y límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, y deba quedar fuera de operación el sistema de tratamiento de aguas residuales, el Sujeto Regulado deberá dar aviso a la CONAGUA, al menos 30 días hábiles antes de que esto ocurra, e indicar el periodo por el que prevalecerá dicha situación, el cual **no deberá exceder de tres meses**, y podrá presentarse **hasta un máximo de dos ocasiones** durante la vigencia del Programa.

De llevar a cabo la suspensión de sus procesos de tratamiento de aguas residuales sin el aviso correspondiente se aplicarán las sanciones previstas. Una vez recibida la solicitud, el Sistema de Gestión emitirá el comprobante que acreditará que la solicitud fue hecha en tiempo y forma.

Artículo 23. En caso de incumplimiento a los compromisos establecidos en el Programa para el Cumplimiento, quedan sin efecto las prerrogativas que ampara dicho documento, por lo cual el Sujeto Regulado será acreedor a las sanciones que correspondan y, en su caso, estará obligado a efectuar el pago de los derechos por el uso y aprovechamiento de cuerpos receptores de descargas de aguas residuales propiedad de la nación, a partir de la fecha del incumplimiento, así como de aquéllos que se hubieren generado con anterioridad, con sus accesorios, conforme a la LFD vigente.

Programa de inversión anual

Como se mencionó anteriormente, el monto de inversión total del Plan de Acciones es de 109.03 millones de pesos (mdp), inversión a realizarse en 5 años a partir del año 2023 hasta marzo del 2027, acorde al plazo previsto en los Lineamiento que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el presente apartado se muestra el desglose anual del Plan de Acciones, donde se describe el monto de inversión por año y unidad de proceso y/o componente del proyecto programado, así como los importes anuales y acumulados y su porcentaje de participación en la inversión.

Tabla 23:
Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
A	Proyecto ejecutivo	0.00	1.50	0.00	0.00	0.00	1.50
		0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
B	Cárcamo, regulación, pretratamiento, y/o tratamiento primario	0.00	0.00	19.36	19.36	0.00	38.72
		0.0%	0.0%	50.0%	50.0%	0.0%	100.0%
C	Tren de tratamiento de agua	0.00	8.18	8.18	0.00	0.00	16.37
		0.0%	50.0%	50.0%	0.0%	0.0%	100.0%
D	Tratamiento terciario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
E	Tren de tratamiento de lodos	0.00	0.00	9.23	3.95	0.00	13.18
		0.0%	0.0%	70.0%	30.0%	0.0%	100.0%
F	Cogeneración (y/o paneles solares)	0.00	0.00	0.00	11.34	0.00	11.34
		0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	100.0%

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
G	Equipo menor	0.00	0.48	1.80	1.70	0.00	3.98
		0.0%	11.9%	45.3%	42.7%	0.0%	100.0%
H	Terracerías, vialidades y patios	0.00	0.38	1.44	1.36	0.00	3.18
		0.0%	11.9%	45.3%	42.7%	0.0%	100.0%
I	Obra eléctrica	0.00	0.95	3.61	3.40	0.00	7.96
		0.0%	11.9%	45.3%	42.7%	0.0%	100.0%
J	Automatización	0.00	0.29	1.08	1.02	0.00	2.39
		0.0%	11.9%	45.3%	42.7%	0.0%	100.0%
K	Imprevistos y contingencias	0.00	0.76	2.89	2.72	0.00	6.37
		0.0%	11.9%	45.3%	42.7%	0.0%	100.0%
L	Supervisión	0.43	1.65	1.55	0.00	0.00	3.64
		11.9%	45.3%	42.7%	0.0%	0.0%	100.0%
M	Capacitación	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.40
		0.0%	50.0%	50.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	Total anual y gran total, mdp's	0.00	12.97	49.45	46.61	0.00	109.03
	Acumulado anual, mdp's	0.00	12.97	62.42	109.03	109.03	
	Total anual y gran total, %	0.0%	11.9%	45.4%	42.8%	0.0%	100%
	Acumulado anual, %	0.0%	11.9%	57.2%	100.0%	100.0%	

A continuación se muestra de manera gráfica el monto de inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR:

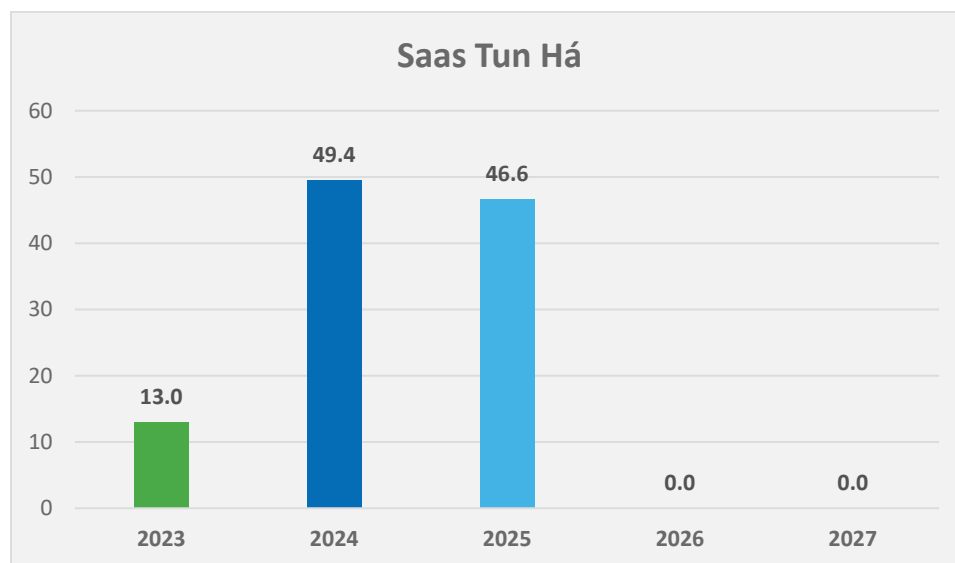


Figura 24 Inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR

Bibliografía

CONAGUA. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. . México: CONAGUA.

GIZ, C. A. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Mexico: GIZ.

Metcalf & Eddy / AECOM. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. NY: McGraw-Hill.

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4a ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.

US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Sur

Contenido

PTAR Sur	1
Contenido	4
Índice de Tablas	6
Índice de Figuras.....	7
1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más.....	9
Descripción general de la PTAR Sur.....	9
Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases	10
Descripción general del proceso	11
Diagrama de flujo de proceso	12
Descripción de las unidades de proceso	13
Tren de Tratamiento de Agua	13
Cárcamo de bombeo	13
Pretratamiento	13
Filtro rociador	13
Reactores de lodos activados	13
Clarificador secundario.....	15
Desinfección	15
Disposición y aprovechamiento de agua tratada.....	16
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua.....	19
Tren de Tratamiento de Lodo.....	22

Digestor aerobio de lodo	22
Desaguado de lodo y Secado.....	22
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de lodo	24
Estado de conservación y operación de las instalaciones.....	27
Análisis de calidad del agua cruda.....	29
Calidad de agua cruda, histórica	29
Calidad de agua cruda, de este Estudio	30
Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada.....	33
Calidad de agua tratada, histórica.....	33
Calidad de agua tratada, de este Estudio.....	35
Parámetros de operación del reactor de lodos activados	37
Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua	39
Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR	40
Costos de operación y mantenimiento (O & M) reportados por el Organismo Operador ..	40
Estimación de los costos de operación y mantenimiento	41
Observaciones y recomendaciones generales	45
2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	47
3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	52
Techo financiero	52
Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales	54
Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares	58
Resumen de inversión, techo financiero.....	62
4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	65
Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	66

Aspectos Clave de los Lineamientos	66
Programa de inversión anual	69
Bibliografía.....	73

Índice de Tablas

Tabla 1: Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR Sur	14
Tabla 2: Dimensiones Clarificador Secundario PTAR Sur	15
Tabla 3: Dimensiones Tanque de Contacto de Cloro PTAR Sur	15
Tabla 4: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua.....	20
Tabla 5: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo	25
Tabla 6: Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)	30
Tabla 7: Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente	32
Tabla 8: Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)	33
Tabla 9: Caracterización del agua tratada de este Estudio (<i>E. coli</i> y Huevos de helminto)	36
Tabla 10: Cumplimiento del agua tratada.....	37
Tabla 11: Oxígeno disuelto en reactor de lodos activados de la PTAR Sur	38
Tabla 12: Ubicación de pozos de infiltración PTAR Sur	39
Tabla 13: Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales	42
Tabla 14: Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M.	43
Tabla 15: Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Sur	47
Tabla 16: Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Sur	49
Tabla 17: Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio	53

Tabla 18: Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	62
Tabla 19: Monto de inversión, millones de pesos.....	64
Tabla 20: Estimación detallada de costos PTAR Sur.....	64
Tabla 21: Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado	69

Índice de Figuras

Figura 1 Vista Aérea PTAR Sur	9
Figura 2 Diagrama de Flujo de Proceso Actual PTAR Sur	12
Figura 3 Vista general PTAR Sur	16
Figura 4 Cono Desarenador y Plataforma de Pretratamiento	17
Figura 5 Cono Desarenador y Filtro Rociador y Vista General de PTAR.....	17
Figura 6 Cárcamo de Elevación de Filtro Rociador y Caja Distribuidora	17
Figura 7 Reactor de Lodos Activados Zona Anóxica (Izquierda) y Zona Aerobia (Derecha)	18
Figura 8 Clarificador Secundario	18
Figura 9 Tanque de Contacto de Cloro y Caseta de Dosificación de Cloro	18
Figura 10 Medidor de Caudal Infiltrado y Pozo de Infiltración	19
Figura 11 Caseta de Lodos y Mesa Espesadora.....	23
Figura 12 Digestor Aerobio de Lodos en celda de Reactor de Lodos Activados	23
Figura 13 Tanque de Lodos Espesados (izquierda) y Tanque de Recepción de Lodos (derecha)	23
Figura 14 Sistema Control de Olor y Centrífuga de Desaguado de Lodos	24
Figura 15 Caracterización del agua cruda (sep-2022)	31
Figura 16 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)	34
Figura 17 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT).....	35
Figura 18 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)	36

Figura 19 Toma de muestra OD y SS PTAR Sur.....	38
Figura 20 Pozos de infiltración PTAR Sur.....	39
Figura 21 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m3.....	44
Figura 22 Diagrama de flujo de la PTAR Sur con las acciones propuestas (sombreado en verde)	51
Figura 23 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	63
Figura 24 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	72

1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más

Descripción general de la PTAR Sur

La PTAR Sur se ubica dentro de la ciudad de Cancún en el municipio de Benito Juárez, y proporciona saneamiento a las aguas residuales domésticas de una parte de la zona urbana de Cancún. Aguakan es responsable de la operación y mantenimiento de la PTAR, así como de la obtención de los recursos económicos requeridos para su ampliación, modernización, rehabilitación y sustitución de equipos. En la Figura 1 se presenta la vista general satelital de la PTAR Sur.



Figura 1 Vista Aérea PTAR Sur

Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases

La PTAR Sur inició su construcción en el año 2008. Tiene capacidad nominal para tratar en promedio de 200 L/s de agua residual. Para lo cual, acorde con su capacidad, en 2021 recibió un caudal promedio de 134 L/s.

La PTAR Sur se integra por los procesos que se mencionan a continuación, se indica entre paréntesis el número de unidades de cada uno:

Tren de tratamiento de agua:

- + Cárcamo final
- + Pretratamiento: Cribado medio mecánico (1), cribado fino mecánico (1) y cono desarenador (1).
- + Filtro rociador (1)
- + Reactor de lodos activados para remoción de nitrógeno (1)
- + Clarificación secundaria (1)
- + Tanque de contacto de cloro con cloro gas (1)
- + Pozos de infiltración de agua tratada (4)

Tren de tratamiento de lodos:

- + Tanque de recepción de lodos (1)
- + Mesa de espesado (1)
- + Digestión aerobia, aireación difusa (1)
- + Tanque de lodo espesado (1)
- + Desaguado mecánico, en centrífuga (1)
- + Sistema para control de olor

La PTAR Sur cuenta con la obra civil ejecutada para dos trenes de tratamiento, con capacidad unitaria de 200 L/s, de los cuales uno se encuentra equipado completamente. Aguakan cuenta con un plan de desarrollo para complementar el equipo del segundo tren de tratamiento según el año y la generación de aguas residuales. Por esta razón y como se verá más adelante, algunas estructuras tienen un uso actual distinto del planeado o parecen vacías y/o más grandes de lo necesario.

Descripción general del proceso

El agua residual ingresa al cárcamo final dentro de la PTAR Sur desde donde se bombea hacia la plataforma de pretratamiento. El pretratamiento inicia con un canal con cribado medio y fino, ambos mecánicos. Posteriormente el agua pasa a un cono desarenador para separar arenas y natas del agua residual.

El agua pretratada se dirige hacia un filtro rociador, el distribuidor de agua del filtro opera con un motorreductor en el centro y distribuye el agua con 4 brazos horizontales. El agua efluente del filtro ingresa a un cárcamo de recirculación y elevación. El cárcamo tiene la función de recircular agua al filtro rociador y también de bombear agua hacia el reactor de lodos activados. En este cárcamo ingresan los retornos de agua recuperada de espesado y desaguado.

Desde el cárcamo de elevación, el agua se bombea hacia el reactor de lodos activados. El reactor está diseñado para la remoción de nitrógeno por nitrificación-desnitrificación biológica, y cuenta con dos secciones anóxicas y tres secciones aerobias. Las secciones anóxicas, sin aireación, cuentan con agitadores sumergibles para mantener la biomasa suspendida. Adicionalmente, cuenta con bombas para recircular internamente licor mezclado del final del reactor, en la zona aerobia, al inicio de la zona anóxica.

El licor mezclado se conduce hacia el clarificador secundario, donde se separa la biomasa del agua. Desde esta unidad se realiza el retorno de lodos a los reactores y la purga de lodo. El agua clarificada se conduce hacia el tanque de contacto de cloro para su desinfección mediante cloro gas. El agua tratada se envía hacia los cuatro pozos de infiltración. Cada pozo de infiltración cuenta con un medidor de flujo para registrar la cantidad de agua descargada, dado que algunos pozos tienen más capacidad que otros.

La planta cuenta con un tanque de recepción de lodo donde se descargan el lodo crudo desaguado procedente de la PTAR Caribe. Este lodo se fluidiza con adición de agua tratada y se envía al tanque de lodo espesado para combinarse con el lodo generado en la PTAR Sur y continuar su tratamiento.

El lodo secundario purgado se manda hacia la mesa espesadora de lodo y posteriormente al tanque de lodo espesado previo al digestor aerobio, que temporalmente se ubica en uno de los dos reactores de lodos activados.

La aireación del reactor y digestor se realiza por aire difuso. El lodo digerido se envía primero a un tanque de almacenamiento de lodos para después bombearlo hacia el desaguado en centrífuga. Los lodos generados en la PTAR Sur, ya desaguados, son transportados para su secado y disposición final a la PTAR Norponiente

Diagrama de flujo de proceso

Para facilitar la comprensión de los procesos de tratamiento, más adelante, en la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo simplificado del proceso actual de tratamiento de agua y lodos.

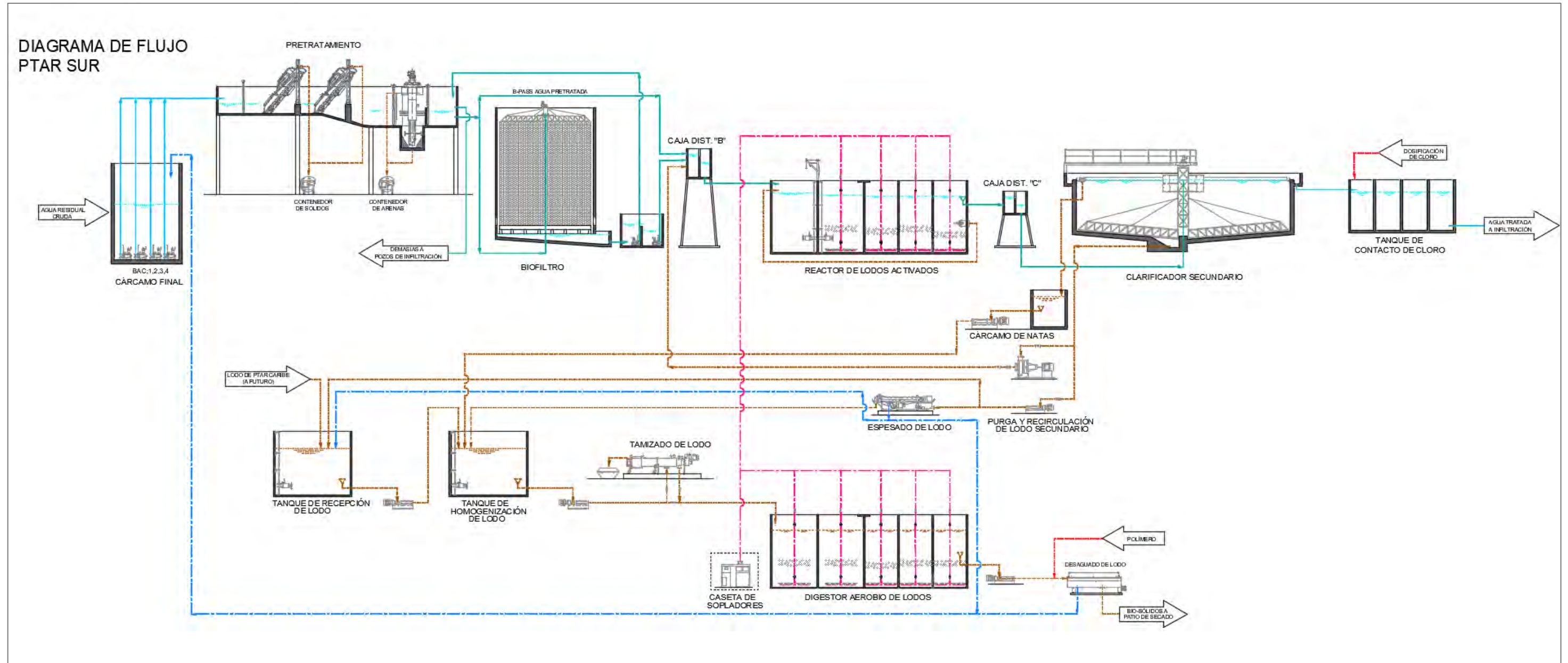


Figura 2 Diagrama de Flujo de Proceso Actual PTAR Sur

Descripción de las unidades de proceso

Como parte del trabajo de campo elaborado en este Estudio, se recopiló información sobre las características, dimensiones y condiciones de operación y mantenimiento de las unidades de proceso de la PTAR.

Tren de Tratamiento de Agua

Cárcamo de bombeo

El agua entra a la PTAR desde el emisor principal hacia el cárcamo final. El cárcamo cuenta con una batería de cuatro bombas sumergibles para elevar todo el caudal de agua residual influente hacia la plataforma de pretratamiento. Todas las bombas cuentan con variador de frecuencia, por lo que es posible optimizar el gasto de energía en esta etapa. El cárcamo cuenta con espacios vacíos para la instalación de nuevas bombas en el futuro.

Pretratamiento

El pretratamiento se compone de cribado medio y fino mecánico para remover basuras, seguido de un cono desarenador para remover arenas y natas (Figura 4). Los cribados finos se recolectan para compactarlos y reducir su contenido de agua. Las arenas son mandadas a un clasificador de arenas para retirar la mayor cantidad de agua posible y las natas a un contenedor para su disposición con un servicio especializado.

La plataforma de pretratamiento se encuentra construida en su totalidad, pero solo se encuentra equipado uno de los dos trenes disponibles. No se presenta ningún problema operativo en la unidad y todos los equipos y estructuras se encuentran en buen estado. Este mismo caso se repite en toda la PTAR que se encuentra en excelentes condiciones.

Filtro rociador

El agua pretratada entra al filtro rociador (Figura 5), dentro de este se distribuye mediante cuatro brazos giratorios sobre el lecho empacado. El agua efluente del filtro rociador entra a un cárcamo de recirculación y elevación (Figura 6). Esta estructura se divide en dos secciones. La primera sección recibe el efluente del filtro rociador y se realiza el bombeo para la recirculación de este. El excedente de la primera sección del cárcamo rebosa por un vertedor hacia la segunda sección, la cual recibe también el retorno de agua recuperada de espesado y desaguado.

Desde la segunda sección del cárcamo de elevación el agua se conduce hacia la caja distribuidora (Figura 6) donde se reúne junto con el retorno de licor mezclado antes de dirigirse hacia el reactor de lodos activados. Las bombas de recirculación del filtro rociador y las bombas de elevación al reactor de lodos activados cuentan con variador de frecuencia y se encuentran todas operacionales.

Reactores de lodos activados

Desde la caja distribuidora el agua se dirige hacia el reactor de lodos activados (Figura 7). El reactor está diseñado para remover nitrógeno y se compone de seis secciones; las primeras dos anóxicas y

las últimas cuatro aerobias. Las secciones anóxicas cuentan cada una con un agitador sumergible para mantener la biomasa en suspensión, además se cuenta con bombas de recirculación interna para retornar agua de la última sección aerobia a la primera sección anóxica.

Una fracción de agua pretratada se by-pasea del filtro biológico y se envía a la caja distribuidora para pasar directamente al reactor de lodos activados, de acuerdo a información del operador se deriva aproximadamente el 50% del agua pretratada, esto con el fin de tener la materia orgánica suficiente para el proceso de denitrificación en el tanque anóxico.

Las bombas de recirculación interna cuentan con variador de frecuencia, por lo que es posible regular el caudal retornado, con un máximo de hasta 300% del caudal influente de 200 L/s. El reactor cuenta con medición de oxígeno disuelto y sólidos suspendidos totales, aunque, al momento de la visita, seguían en proceso de entrega. Toda la estructura y los equipos se encuentran en buen estado. Las dimensiones de los reactores se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1:
Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR Sur

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	2
Secciones por reactor		Anóxicas: 2 Aerobias: 4
Largo por sección anóxica	m	15
Ancho por sección anóxica	m	7.5
Largo por sección aerobia	m	15
Ancho por sección aerobia	m	7
Tirante hidráulico	m	5.50
Volumen total	m ³	Volumen anóxico: 1,238 Volumen aerobio: 2,310

La obra civil del reactor de lodos activados está completa, aunque solo se encuentra equipado uno de los dos trenes disponibles. El reactor restante está adaptado como digestor aerobio de lodos. Esta adaptación es temporal y regresará a su función de reactor de lodos activados conforme a las necesidades de crecimiento de la PTAR. Para abastecer de aire al reactor y la digestión se cuenta con

cinco sopladores, aunque el sistema se abastece con solo uno. Cada soplador cuenta con variador de frecuencia.

Clarificador secundario

El licor mezclado se dirige hacia un clarificador secundario (Figura 8), desde este se realiza la recirculación y la purga de lodo. El clarificador se encuentra en excelentes condiciones, tanto la estructura como los equipos electromecánicos. Las bombas de purga de lodo cuentan con variador de frecuencia. Las dimensiones de los clarificadores se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2:
Dimensiones Clarificador Secundario PTAR Sur

Concepto	Unidad	Valor
Diámetro	m	28
Número de unidades	No.	1
Área	m ²	616
Tirante hidráulico, SWD	m	3.0 o 3.65

Desinfección

El agua de cada clarificador se dirige hacia el tanque de contacto de cloro (Figura 9) para su desinfección con gas cloro. La caseta de dosificación es de tipo cerrada y cuenta con detector de fugas de cloro, además de un kit B para el control de fugas. No se reportan obstáculos o problemas de operación en esta unidad y cumple con las medidas de seguridad requeridas para el manejo de cloro. Las dimensiones del tanque de contacto de cloro de muestran en la Tabla 3

Tabla 3:
Dimensiones Tanque de Contacto de Cloro PTAR Sur

Concepto	Unidad	Valor
Volumen	m ³	770
Canales	No.	5

Concepto	Unidad	Valor
Largo – ancho canal - tirante	m	22.0 – 2.0 – 3.5

Disposición y aprovechamiento de agua tratada

Del tanque de contacto de cloro el agua tratada se dirige a alguno de los cuatro pozos de infiltración. No existe aprovechamiento de agua para reúso por lo que toda el agua se dirige a infiltración. Además, cada pozo cuenta con un medidor de flujo para registrar el caudal ingresado a este.

Vistas del tren de tratamiento de agua

De la Figura 3 a la Figura 10 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de agua de la PTAR.



Figura 3 Vista general PTAR Sur



Figura 4 Cono Desarenador y Plataforma de Pretratamiento



Figura 5 Cono Desarenador y Filtro Rociador y Vista General de PTAR



Figura 6 Cárcamo de Elevación de Filtro Rociador y Caja Distribuidora



Figura 7 Reactor de Lodos Activados Zona Anóxica (Izquierda) y Zona Aerobia (Derecha)

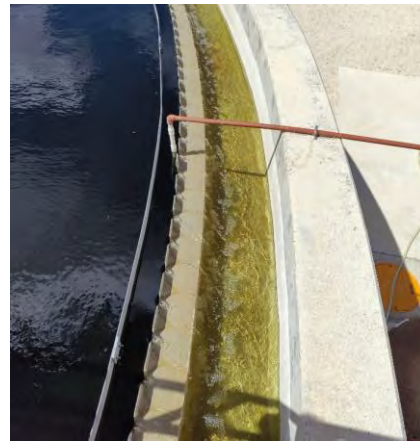


Figura 8 Clarificador Secundario



Figura 9 Tanque de Contacto de Cloro y Caseta de Dosificación de Cloro



Figura 10 Medidor de Caudal Infiltrado y Pozo de Infiltración

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua

Con el fin de verificar que las principales estructuras de proceso del tren de tratamiento de agua sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes en el agua cruda, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para tal efecto se utilizaron las dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior, los datos de caudal y calidad de agua cruda utilizados son los siguientes:

- + Caudal medio de diseño 200 L/s
- + Calidad de agua cruda promedio (histórico)
- + DBO, 320 mg/L
- + SST, 295 mg/L

En la Tabla 4 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de agua, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR Sur con las dimensiones de las estructuras, en caso de no contar con algún dato de operación se asignó un valor promedio del rango típico.

Tabla 4:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Sur
Filtro biológico			
Caudal medio que ingresa al FR	L/s	No aplica	100
Carga orgánica volumétrica	kg/m ³ -d	0.4 a 1.8	0.30
Porcentaje de remoción de DBO en FR esperado	%	70 a 90%	80%
Reactor de Lodos Activados			
Concentración de DBO influente al reactor	mg/L	No aplica	192
Concentración de SSTLM	mg/L	3,000 - 4,000	3,500
Fracción volátil		0.7 a 0.8	0.75
Relación F/M	kg/kg - d	0.2 a 0.6	0.36
Carga volumétrica	KgDBO/m ³ - d	0.3 a 1.6	0.94
Tiempo hidráulico de retención total	horas	5 a 15	5
Tiempo hidráulico de retención zona anóxica	horas	1 a 3	1.7
Tirante hidráulico	m	4.5 a 7.5	5.5
Clarificador Secundario			
Carga hidráulica superficial, Caudal medio	m ³ /m ² -d	16 a 28	28
Recirculación	%	25 a 100%	100%
Carga de sólidos, Caudal medio	Kg/m ² - h	4 a 6	8.2

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Sur
Tirante hidráulico	m	4 a 5	3.0 o 3.65
Tanque de contacto de cloro			
Tiempo hidráulico de retención	min	30	64.2

¹ Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + Los principales criterios de diseño del filtro biológico, reactor de lodos activados y tanque de contacto de cloro están dentro de los rangos típicos recomendados en la bibliografía especializada.
- + El filtro biológico opera con baja carga orgánica volumétrica debido al by-pass requerido para incrementar la disponibilidad de materia orgánica en la etapa de denitrificación.

El filtro biológico se puede mantener en condición de baja carga orgánica durante la etapa actual con capacidad para 200 L/s, debido a que no tiene efecto adverso en su desempeño, ya que a menor carga aumenta el porcentaje de remoción de DBO y, en condiciones de muy baja carga, puede ocurrir nitrificación parcial.

Lo anterior en tanto se cumpla la tasa de mojado mínimo que requiere el medio plástico (0.5 l/m² por segundo), el cárcamo de recirculación tiene equipos de bombeo con capacidad suficiente para complementar la tasa de mojado requerida.

- + Acorde al tiempo hidráulico de retención, el tanque de contacto de cloro tiene capacidad para tratar el doble de caudal medio de diseño actual (400 L/s).
- + El clarificador secundario existente (28 m de diámetro) se diseñó en el límite superior del rango de carga hidráulica recomendada por las referencias especializadas y la carga de sólidos supera el límite superior aceptable para condición de caudal medio. Tiene capacidad para manejar, dentro de rangos de carga hidráulica y de sólidos aceptables, un caudal medio de 160 L/s.
- + Actualmente la PTAR no presenta problemas por la falta de área en el clarificador secundario debido a que está tratando menos de 200 L/s, sin embargo a corto plazo será necesario aumentar el área de clarificación.
- + Debido que es poco práctico construir y operar un clarificador de 15 m de diámetro que proporcione el área requerida faltante para manejar 200 L/s, se propondrá que el segundo clarificador se construya con capacidad para 240 L/s (35 de diámetro), para que ambas unidades proporcionen la capacidad media de 400 L/s de la segunda etapa de la planta.
- + Se recomienda considerar mayor profundidad de pared lateral para el futuro clarificador.

Tren de Tratamiento de Lodo

Digestor aerobio de lodo

La purga de lodo secundario se conduce hacia la mesa espesadora (Figura 11) para aumentar su concentración de sólidos. La mesa de espesado es de 2 metros de ancho de banda y se encuentra dentro de la caseta de lodos, este edificio está construido para cumplir las necesidades de la PTAR hasta su etapa futura. Por esta razón se observa mucho más grande que los equipos que alberga. Dentro de la caseta se ubican los equipos de espesado, desaguado de sólidos, así como la preparación de polímero y los cuartos de control de motores de todos estos equipos.

El lodo espesado ingresa al digestor aerobio de lodos (Figura 12). El digestor se encuentra habilitado sobre la segunda celda del reactor de lodos activados, por lo que comparte dimensiones con esta unidad. Parte de las modificaciones de esta etapa consiste en tener un menor tirante de agua los tanques, así como cambiar el arreglo de distribución de aire difuso en cada tanque.

Desaguado de lodo y Secado

La PTAR Sur cuenta con un tanque de recepción de lodos, está diseñado para en un futuro recibir el lodo desaguado de la PTAR Caribe, en este tanque se vuelve a hidratar y se envía al tanque de homogenización de lodo donde se mezcla con el lodo espesado y natas de la PTAR Sur para de ahí mandarse en conjunto a digestión, pasando a través de un tamiz de lodo (Figura 13). Ambos tanques de lodos se encuentran tapados y cuentan con sistema de control de olor (Figura 14).

Desde el digestor de lodo se bombea lodo hacia el desaguado por centrifuga (Figura 14) con capacidad volumétrica de 30 a 40 m³/h, el lodo desaguado se recolecta y manda a disposición final a la PTAR Norponiente. Actualmente el desaguado de lodo opera 3 días a la semana.

Vistas del tren de tratamiento de lodo

De la Figura 11 a la Figura 14 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de lodo de la PTAR.



Figura 11 Caseta de Lodos y Mesa Espesadora



Figura 12 Digestor Aerobio de Lodos en celda de Reactor de Lodos Activados



Figura 13 Tanque de Lodos Espesados (izquierda) y Tanque de Recepción de Lodos (derecha)



Figura 14 Sistema Control de Olor y Centrífuga de Desaguado de Lodos

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de lodo

Con el fin de verificar que las principales estructuras y equipos de proceso del tren de tratamiento de lodo sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño más relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para esta evaluación se consideraron las siguientes premisas de cálculo:

- + Dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior
- + Producción de lodos, se estimó con base en la fórmula simplificada de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) con los datos de caudal medio de diseño y calidad de agua cruda promedio del histórico (SST y DBO), mismos que se utilizaron para la evaluación del tren de agua (US EPA, 1993).
- + Para determinar el volumen de lodos se utilizaron las concentraciones típicas esperadas en la purga de lodo secundario.
- + De manera conservadora, se consideró que los equipos mecánicos de espesado y desaguado operan 5 días por semana 16 horas por día.
- + En la Tabla 8 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de lodo, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR Sur con las dimensiones de las estructuras y capacidades de equipos, en caso de no contar con algún dato de operación se consideró un valor promedio del rango típico.

Tabla 5:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Sur
Producción de lodo			
Producción de lodo esperada	kg SST /día	No aplica	4,782
Concentración		0.5 a 1.5%	0.70%
Flujo volumétrico	m ³ /día	No aplica	683
Mesa espesadora de lodo			
Ancho de banda	m	1 a 3	2
Carga de sólidos (por metro)	Kg/h	200 a 600	209
Carga hidráulica (por metro)	L/s	6.7 - 19	8.3
Porcentaje de captura considerado		90 a 98%	95%
Concentración de lodo espesado esperada		4 a 9%	3.5%
Volumen de lodo espesado estimado	m ³ /día	No aplica	130
Masa de lodo espesado estimada	kg SST /día	No aplica	4,543
Digestión Aerobia de lodo			
Carga de sólidos volátiles	kgSSV/m ³ -d	1.6 a 4.8	1.0
Tiempo de retención hidráulico (edad de lodo, ~28°C)	días	18 a 20	31
Destrucción esperada		38 a 50%	45.0%
Masa de lodo digerido estimada	kg SST /día		3,010

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Sur
Desaguado de Lodo (centrífuga)		No aplica	
Captura de sólidos	%	>95%	95%
Capacidad equipo acorde a marca y modelo	m ³ /h	30 a 40	11

1 Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + Los criterios de diseño del espesador, digestor aerobio y centrífuga están dentro de los rangos típicos recomendados en la bibliografía especializada.
- + El digestor y centrífuga tienen capacidad holgada dado que están seleccionados para recibir el lodo de la PTAR Caribe.

Estado de conservación y operación de las instalaciones

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de agua de la PTAR Sur, evaluadas con base en el cumplimiento de la NOM-001-2021 para suelo cárstico en DQO, SST, NT y PT con el promedio histórico de calidad de agua, se clasifican de **“Buena”**. En la sección **Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada**, se presenta la evaluación de dicha información.

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de lodos, determinadas con base en las condiciones operativas y de desempeño de las operaciones de espesado, digestión y desaguado observadas en la visita, se clasifican como **“Buenas”**. En términos generales las condiciones de mantenimiento de los trenes de tratamiento de agua y de lodos se consideran **“Muy buenas”**. En los párrafos subsecuentes se describe lo observado en la visita técnica efectuada a la PTAR.

La PTAR Sur fue construida en 2008, e inicio operaciones en 2021, con lo que es una de las plantas con operación más reciente de todas las del estado. La PTAR presenta un diseño de proceso adecuado, cumpliendo con casi todos los requerimientos necesarios para cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-2021. Esto incluye un proceso formal de remoción de nitrógeno, con lo que solo resta incluir un proceso de remoción de fósforo

En la visita de campo se observaron los siguientes detalles positivos del manejo de la PTAR:

- + El pretratamiento es adecuado para el tamaño de la PTAR, cuenta con cribados mecánicos medios y finos, compactador de sólidos, y desarenador con clasificador de arenas.
- + El reactor de lodos activados está diseñado para la remoción biológica de nitrógeno. Además se encuentra seccionado para lograr flujo pistón, lo que proporciona mejor calidad de agua. Sin embargo, se diseñó para calidad objetivo de 25 mg/L de nitrógeno total efluente, por lo que requiere adecuaciones para aumentar la remoción de nitrógeno en la etapa preanóxica para lograr la calidad de 15 mg/L.
- + Todas las estructuras, canalizaciones, registros, equipos electromecánicos se encuentran en buenas condiciones.
- + La caseta de dosificación de cloro es de tipo cerrada y cuenta con las medidas de seguridad adecuadas para contener fugas de cloro.
- + El tren de lodos consta de un digestor aerobio temporalmente situado en la celda del reactor de lodos activados, además de mesa de espesado y centrífuga de lodos.
- + La mayoría de los equipos de mayor potencia (bombas de agua cruda, sopladores, bombas de recirculación, entre otros) cuentan con variador de frecuencia.
- + Se cuenta con un sistema de control de olores para los tanques de almacenamiento de lodo de la PTAR.
- + La PTAR cuenta con un parque de paneles solares con los que genera energía eléctrica para su propio uso.
- + La caseta de dosificación de cloro cuenta con las medidas de seguridad necesarias para el manejo de gas cloro.

- + Se cuenta con espesado de lodo.

En general la PTAR Sur se encuentra en excelentes condiciones de mantenimiento, lo que es logrado por una combinación entre lo reciente de los equipos y un plan de mantenimiento preventivo adecuado. Además, cuenta con un grado más alto de instrumentación y control que otras plantas, lo que le permite producir un efluente de mejor calidad. Las acciones requeridas en esta PTAR para lograr cumplir con la norma son menos que en otras plantas y algunas van enfocadas más bien a la optimización del proceso.

En el Anexo 1 (Ficha de la PTAR) se presenta la descripción detallada de las características y condiciones actuales de operación y mantenimiento de las estructuras y equipos del tren de agua y lodos.

Análisis de calidad del agua cruda

Calidad de agua cruda, histórica

Se incluyen diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos, la información fue proporcionada por Aguakan, los análisis fueron efectuados por el laboratorio interno del organismo operador. Los datos de calidad de agua cruda y tratada proporcionados por el organismo operador se encuentran en el apartado Bases de Datos.

Los parámetros incluidos en las bases de datos de Aguakan son los siguientes:

- + Temperatura
- + pH: Potencial de hidrógeno
- + Conductividad
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos sedimentables
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Sólidos suspendidos volátiles (SSV)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂) (efluente)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃) (efluente)
- + Nitrógeno amoniacal (N-NH₃)
- + Nitrógeno total (NT) (efluente)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)
- + Coliformes fecales
- + Cloro residual libre
- + Transmitancia (efluente)
- + Absorbancia (efluente)

Debido a que los resultados de los muestreos fueron previos a la actualización de la NOM-001-SEMARNAT-2021, las bases de datos no incluyen los parámetros adicionales de la nueva norma, como color verdadero, toxicidad y *E. coli*, así mismo incluyen parámetros que no son objeto de estudio en la actual norma, sin embargo, si permiten determinar la calidad de los procesos de tratamiento del agua residual.

Se proporcionaron datos de 101 muestreos de tipo compuesto efectuados en el influente durante el periodo del año 2020 al 2021.

A continuación se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Sur.

Tabla 6:
Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)

Concepto	Q prom. L/s	pH	SST mg/L	SSV mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	G & A mg/L	NTK mg/L	PT mg/L
No. de datos	33	100	101	101	101	101	24	101	101
Mínimo	58.5	6.8	87	18	101	243	23.0	33.91	4.63
1° cuartil	101.4	7.3	168	124	241	556	61.0	70.32	8.64
Promedio	118.7	7.3	295	226	320	736	203.7	76.13	9.97
Mediana	119.5	7.4	230	180	285	669	103.5	75.21	9.51
3° cuartil	132.0	7.5	332	254	343	793	270.5	82.20	11.00
Máximo	180.3	7.7	1,820	1,340	1,953	2,113	788.0	139.42	19.20

Calidad de agua cruda, de este Estudio

Del 21 al 22 de septiembre se efectuó un muestreo compuesto de 24 horas tanto en el influente y efluente de la PTAR Sur, este se efectuó con seis muestras simples, a cada muestra se les realizaron los siguientes análisis de campo:

- + pH
- + Temperatura del agua
- + Cloro residual libre (efluente)

Los parámetros analizados en el laboratorio fueron los siguientes:

- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)

- + Fósforo total (PT)
- + Escherichia coli (efluente)
- + Toxicidad Vibrio fischeri (efluente)
- + Huevos de helminto
- + Color verdadero (UV-Vis) a 436, 525 y 620 nm

Las actividades de colecta, preservación y análisis de las muestras fueron realizadas por personal de Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis (Intertek + ABC Analitic), éste cuenta con la acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA) en la rama de agua número AG-096-029/11 para su laboratorio ubicado en la ciudad de México y AG-096-029/11_S1 para el laboratorio de Mérida, que es donde se realizaron los análisis.

En todos los casos, la preservación y el almacenamiento de las muestras se efectuaron de acuerdo con los lineamientos que establece la normatividad mexicana. Las muestras colectadas fueron preservadas con hielo a una temperatura de 4°C para que no se degradaran, y fueron transportadas en una hielera al laboratorio correspondiente para su análisis.

El transporte se hizo con sumo cuidado, de tal forma que se evitaron los derrames y/o contaminación de muestras debido a rupturas de frascos o cualquier otro accidente. Los diferentes frascos que integran las muestras se preservaron con los reactivos señalados en la normatividad.

En la Figura 15 se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Sur. En el Anexo 3 se presentan los resultados completos del laboratorio del influente y efluente de la PTAR Sur.

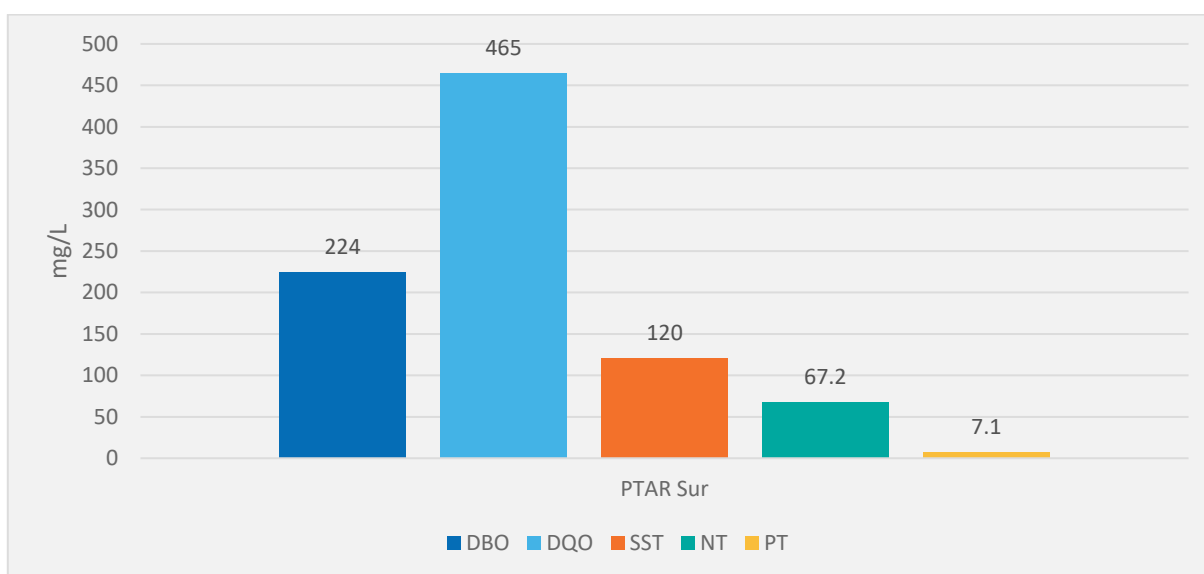


Figura 15 Caracterización del agua cruda (sep-2022)

Con la finalidad de conocer la relación de contaminantes, se realizaron los cálculos que se presentan en la siguiente tabla, los cuales fueron determinados con los promedios obtenidos anteriormente en la tabla y figura previas.

Tabla 7:
Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente

Relación	Promedio (2020-2021)	Valor Estudio 2022	Rango típico en Aguas Residuales Municipales ¹
DBO5/ DQO	0.43	0.48	0.45 – 0.55
SST/ DBO	0.92	0.54	0.80 – 1.20
SSV / SST	0.77	Sin dato	0.70 – 0.80
NTK/ DBO	0.24	0.30	0.10 – 0.20
Fósforo/ DBO	0.03	0.03	0.02

¹ (US EPA, 1993)

De los resultados obtenidos en este Estudio resalta el de SST que es muy bajo en relación de la concentración de DBO. El resto de relaciones, del histórico y de los valores obtenidos en este Estudio, se encuentran dentro o muy cerca de los rangos típicos en aguas residuales municipales.

Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada

En las siguientes figuras y tablas se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada del histórico de datos proporcionados por Aguakan y de los obtenidos en el presente Estudio, en estas se presentan los límites permisibles (LP) establecidos en la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelo cárstico.

Calidad de agua tratada, histórica

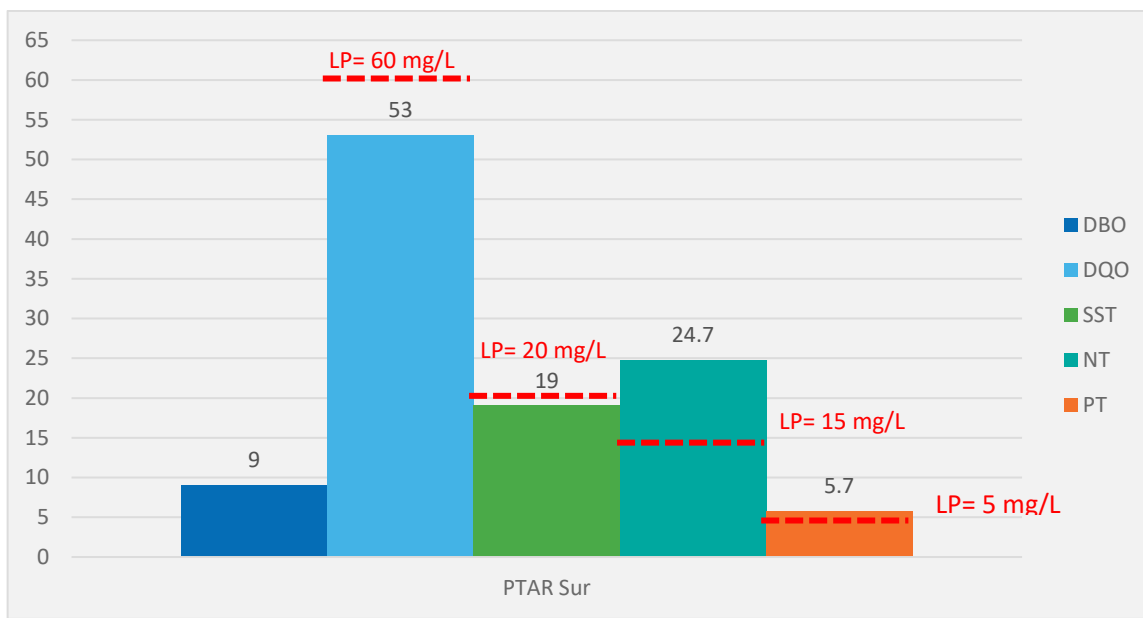
Se proporcionaron datos de 33 muestreos de tipo compuesto efectuados en el efluente durante el periodo del año 2020 al 2021.

En la siguiente tabla se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros en el agua tratada de la PTAR Sur.

Tabla 8:
Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)

Concepto	Q prom. L/s	SST mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	G & A mg/L	NTK mg/L	NT mg/L	PT mg/L
No. De datos	33	33	33	33	8	33	33	33.00
Mínimo	58.5	3	2	20	2.0	2.00	6.7	2.01
1° cuartil	101.4	4	2	26	2.0	4.48	15.6	4.86
Promedio	118.7	19	9	53	4.4	11.64	24.7	5.65
Mediana	119.5	7	8	42	4.5	7.62	19.8	5.67
3° cuartil	132.0	15	14	60	6.0	14.15	29.0	6.60
Máximo	180.3	100	26	150	8.0	55.29	77.9	9.60

A manera de resumen en la Figura 16 se presentan los valores promedio de los principales parámetros del agua tratada de la PTAR Sur, en esta se indican los límites permisibles (LP) para el promedio mensual en la NOM-001.

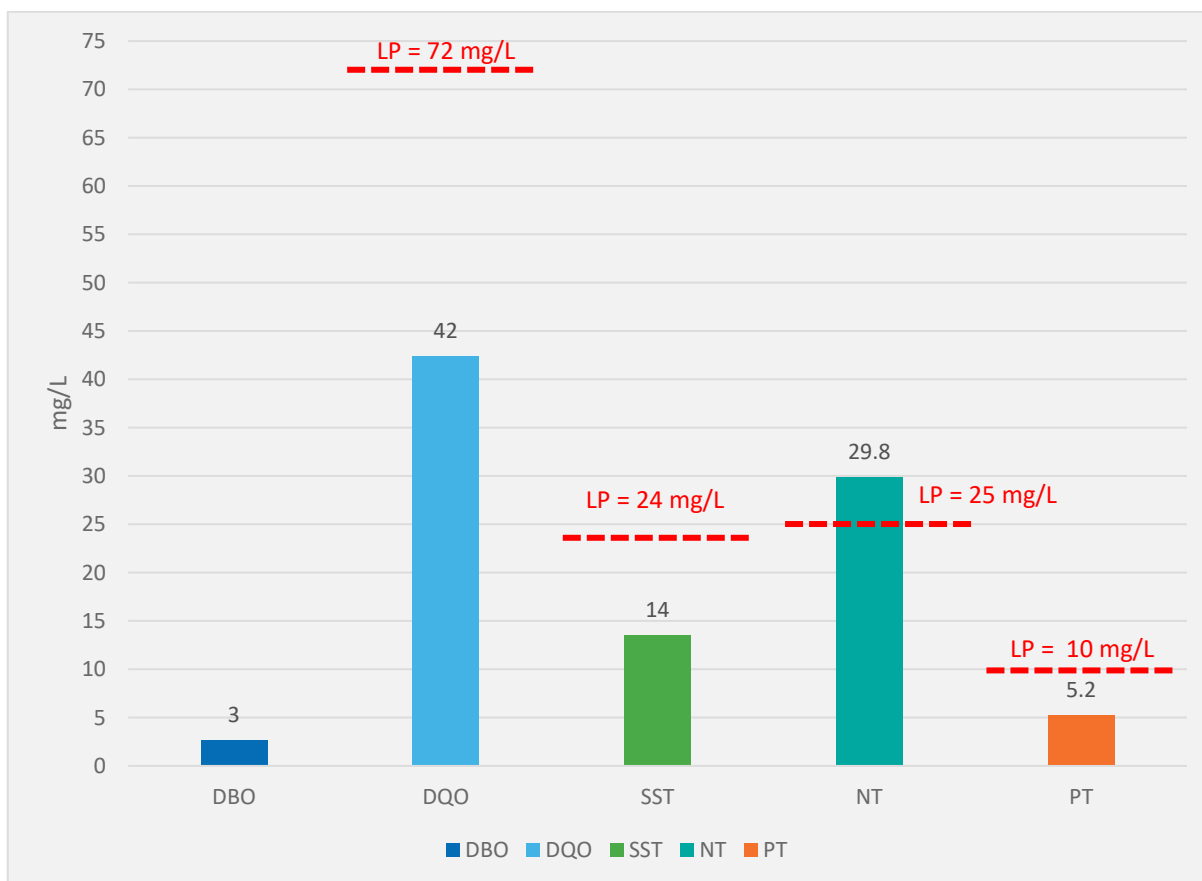


LP = Límite permisible

Figura 16 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)

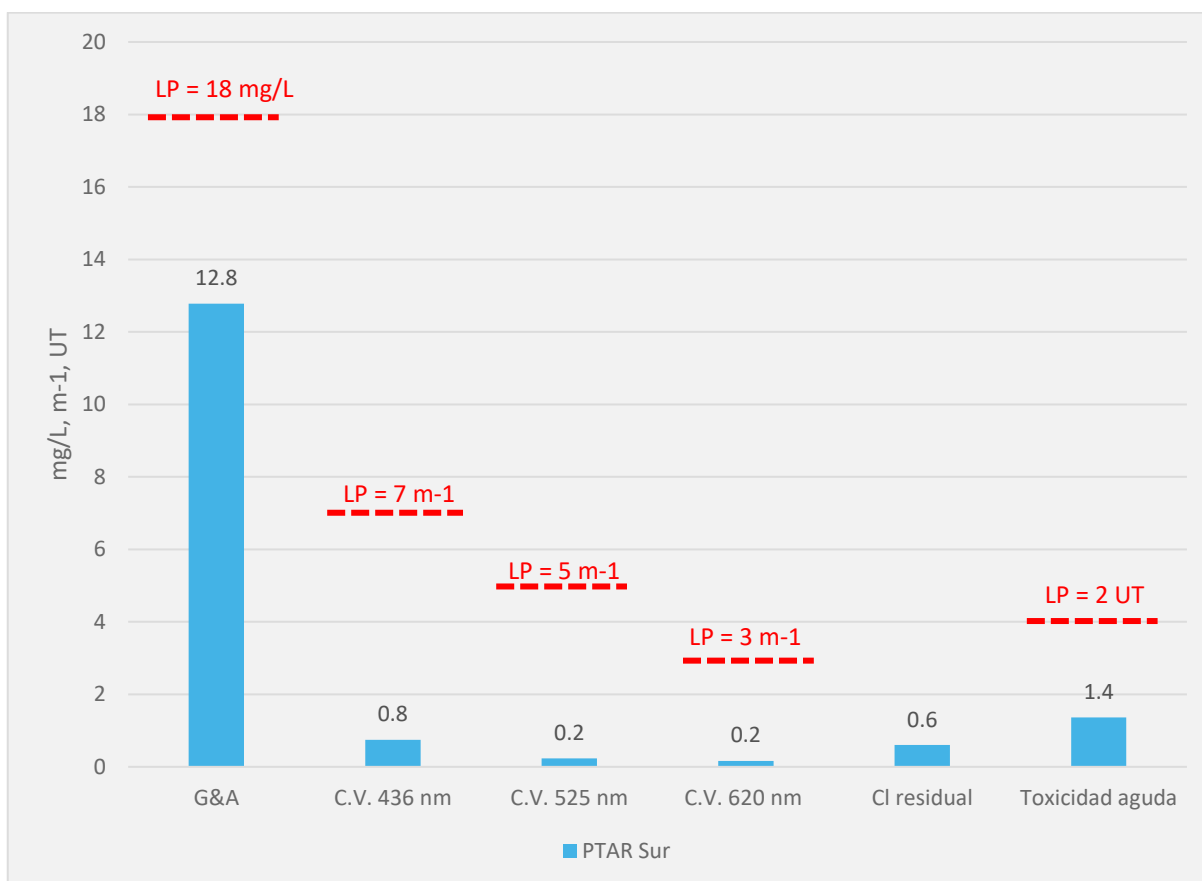
Calidad de agua tratada, de este Estudio

En la siguientes figuras y tabla se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada de la PTAR Sur, en estas se indican los límites permisibles para el promedio diario en la NOM-001-2021.



LP = Límite permisible

Figura 17 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 18 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)

Tabla 9:
Caracterización del agua tratada de este Estudio (*E. coli* y Huevos de helminto)

Parámetro	Unidades	PTAR Sur	Límite permisible NOM-001-2021
E. coli	NMP/100 mL	154	100
Huevos de helminto	HH/L	<0.2	1

Con la información histórica de calidad de agua tratada proporcionada y los resultados de los análisis efectuados se efectuó el análisis del cumplimiento de los principales parámetros de calidad del agua con respecto a la NOM-001-SEMARNAT-2021, para los valores de los datos históricos se utilizó el límite permisible del valor promedio mensual y para los resultados de los muestreos efectuados en este estudio se utilizó el límite permisible del valor promedio diario.

Tabla 10:
Cumplimiento del agua tratada

Parámetro	Valor promedio histórico (2020-2021) (mg/L)	Valor Estudio 2022 (mg/L)	Límite permisible NOM-001-2021	Cumple
SST	19	14	PM = 20 (mg/L) PD = 24 (mg/L)	SI
DQO	53	42	PM = 60 (mg/L) PD = 72 (mg/L)	SI
Nitrógeno total	24.7	29.8	PM = 15 (mg/L) PD = 25 (mg/L)	NO
Fósforo total	5.7	5.2	PM = 5 (mg/L) PD = 10 (mg/L)	NO SI

PM = promedio mensual, PD = promedio diario

Con respecto al color verdadero en las tres longitudes de onda y la toxicidad aguda se obtuvieron valores dentro del límite permisible, la concentración de *E. Coli* estuvo por encima del límite permisible.

Parámetros de operación del reactor de lodos activados

Como parte de los trabajos de caracterización del agua cruda y tratada de la PTAR, también se incluyó la medición de los parámetros de operación del reactor de lodos activados, oxígeno disuelto (OD) y sólidos sedimentables (SS).

El reactor de lodos activados de la PTAR Sur cuenta con un sensor de oxígeno disuelto, del cual se tomó lectura. Además el laboratorio también analizó en campo el OD con un equipo

portátil de la marca Hach. Los datos obtenidos en campo se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11:
Oxígeno disuelto en reactor de lodos activados de la PTAR Sur

Equipo	Valor
Sensor en reactor	1.21
Equipo portátil	0.87

El valor promedio de oxígeno disuelto de ambas mediciones es de 1.0 mg/L, el rango típico de operación es de 1 a 3 mg/L (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014), por lo cual se considera adecuado.

En cuanto a los SS se realizó la prueba con un cono Imhoff en un tiempo de 30 minutos (Figura 19), resultando 350 mL/L, que con un índice volumétrico típico de 120 mL/g equivalen a una concentración de SSLM de 2.92 g/L, el rango típico para este tipo de reactores es de 3 a 4 g/L (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014), el tener un valor más bajo indica que aún tienen margen para aumentar la concentración en el reactor y poder tratar mayor caudal, como se mencionó anteriormente actualmente están operando con un caudal menor al de diseño.



Figura 19 Toma de muestra OD y SS PTAR Sur

Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua

Como parte de las actividades realizadas en campo, se registraron las coordenadas de los pozos de infiltración de cada PTAR, utilizando un equipo GPS map 60Cx marca Garmin. En la Tabla 12 se presentan las coordenadas de localización de los pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR Sur. Posteriormente, en la Figura 20 se presentan fotografías correspondientes al levantamiento de las coordenadas con GPS y de los registros o brocales de los pozos de infiltración.

Tabla 12:
Ubicación de pozos de infiltración PTAR Sur

Concepto	Latitud	Longitud
Pozo de infiltración 1	21.09895	-86.87875
Pozo de infiltración 2	21.0996	-86.87852
Pozo de infiltración 3	21.09976	-86.87846
Pozo de infiltración 4	21.09961	-86.87727



Figura 20 Pozos de infiltración PTAR Sur

Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR

Pendiente de incorporar, no se ha recibido la información por parte de Aguakan.

Costos de operación y mantenimiento (O & M) reportados por el Organismo Operador

De acuerdo a la información proporcionada por Aguakan, el costo total de O & M de la PTAR Sur en el año 2021 fue de 13.04 millones de pesos (mdp's), desagregado de la siguiente forma:

- + Costo de operación: 9.75 mdp's
- + Costo de mantenimiento: 3.29 mdp's

Considerando que el caudal medio de agua tratada en el año 2021 fue de 134 L/s, que representan un volumen anual de 4,225,824 m³, el costo unitario de O & M de la PTAR fue de 3.09 \$/m³ de agua tratada.

En relación a la energía eléctrica consumida en el proceso de tratamiento, la información proporcionada indica los siguientes valores anuales:

- + Consumo anual de energía: 1,918,656 kWh
- + Costo anual: \$ 4,255,631

A partir de los valores previos se calcularon los siguientes indicadores:

- + Costo unitario de la energía. 2.22 \$/kWh
- + Consumo unitario de energía: 0.45 kWh/m³
- + Costo energía respecto al costo O & M: 33 %

En la información de costo total de O & M, así como en el consumo y costo de energía eléctrica, se observa que la PTAR Sur, con excepción de la planta Caribe, tiene el costo unitario y consumo unitario más alto de las plantas de Aguakan debido a que es la planta que trata menor caudal. Otro factor de costo es que, si bien tiene filtro biológico, en éste la remoción

de DBO es parcial para permitir remover Nitrógeno en el reactor de lodos activados, asimismo, tiene el consumo eléctrico asociado a la oxidación del NTK a nitratos y el de las bombas de recirculación de licor mezclado a la zona anóxica.

La concentración efluente de N Total cumple con el objetivo para el que se diseñó, con promedio histórico de 24.7 mg/L, el agua efluente de la PTAR Sur cumple con la calidad establecida en la NOM-001 previa y actual para DBO, DQO y SST.

Estimación de los costos de operación y mantenimiento

A efecto de comparar el costo de operación reportado por Aguakan contra un costo de referencia se procedió a estimar los costos anuales de un grupo de insumos relevantes:

- + Energía eléctrica,
- + Cloro para desinfección,
- + Polímero para espesado y/o desaguado de lodo,
- + Acarreo de lodo desaguado, y
- + Análisis de laboratorio de agua tratada y lodo para cumplimiento normativo y control de proceso
- + Personal de O & M

Para lo anterior, con base en un caudal medio de 134 L/s y con la información de caudal y calidad de agua cruda y tratada proporcionada por el Organismo Operador se efectuó un balance de materia simplificado para establecer la masa de DBO removida, la generación de lodos en el proceso de tratamiento, la remoción de sólidos suspendidos volátiles en el proceso de digestión y la masa de lodo desaguado a disposición.

Una vez definidos en el balance de materia los valores requeridos, a partir del caudal y calidad del agua cruda influente a la planta, se procedió a aplicar los factores de dosificación o consumo de los principales insumos (energía eléctrica, cloro polímero para espesado y/o polímero para desaguado) con base en las prácticas adecuadas de operación y, en el caso de los análisis de laboratorio de agua tratada y lodos, a partir de los requerimientos normativos.

En la Tabla 13 se presentan las consideraciones aplicadas para establecer el consumo de los insumos arriba indicados, así como el costo unitario asignado:

Tabla 13:
Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Energía eléctrica	Caudal medio de agua tratada y concentración promedio de DBO	2.08 kWh/kgDBO	2.50 \$/kWh
Cloro	Caudal medio de agua tratada	5.0 mg/L	20 \$/kg
Polímero para espesado	Producción de lodo con base en caudal medio y concentración promedio de DBO y SST	4.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Polímero para desaguado	Fracción volátil del 75 % del lodo producido y remoción del 40 % de SSV en digestor	7.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Acarreo lodo desaguado, base húmeda	Lodo desaguado al 20 % de sólidos Masa de lodo en base seca/0.20	Ton de lodo en base húmeda	150 \$/ton
Análisis laboratorio Agua tratada	NOM-001 población > 50 mil habitantes	2 muestreos/mes	8,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Lodo / biosólidos	NOM-004 hasta 1,500 ton/año (base seca)	1 muestreos/año	10,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Control de proceso	---	1 lote por mes	6,000 \$/mes

El costo del mantenimiento preventivo de la PTAR y los consumibles asociados a esa actividad se estimó aplicando el criterio de destinar un importe anual equivalente al 0.85 % del costo de inversión de la planta con sus actuales características. El costo de la planta se estableció a partir de un costo base de 750 mil pesos por litro – segundo de capacidad media instalada.

Para establecer el costo del personal de operación y mantenimiento se considera una plantilla “tipo” de doce personas, misma que se desagrega en las siguientes plazas: 1 Jefe de planta, 2 Supervisores de operación/mantenimiento, 5 operadores y 4 auxiliares de operación o mantenimiento.

Los sueldos considerados para establecer este rubro de costo están en el rango de 28,000 pesos mensuales para el Jefe de planta y de 12,000 pesos por mes para el auxiliar de operación, los sueldos del resto del personal están comprendidos dentro de este rango.

Los sueldos nominales se afectaron por un factor de 1.50 para incorporar el costo de las diversas prestaciones y seguridad social del personal. De esta forma se determinó un costo total mensual de \$ 306, 000 por concepto de personal.

El factor unitario de consumo de energía eléctrica asignado permite establecer, además de la energía consumida por la planta, otros dos indicadores que en la PTAR Gucumatz tienen el siguiente valor:

- + Consumo unitario de energía: 0.61 kWh/m³
- + Potencia media de operación: 740 kilowatts

En la Tabla 14 se presentan los consumos e importes anuales de los rubros de costo establecidos, así como el costo unitario de cada rubro, al dividir su importe anual entre el volumen de agua tratada. Posteriormente, en la Figura se presenta de manera grafica el costo unitario desagregado por insumo.

Tabla 14:
Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M

Insumo	Consumo anual	Importe anual \$/año	Costo unitario, \$/m3
Energía eléctrica	2,592,903	6,482,256	1.52
Cloro	21,287	425,736	0.10
Polímero para espesado	5,747	862,115	0.20
Polímero para desaguado	8,046	1,206,962	0.28
Acarreo lodo desaguado	5,029	754,351	0.18
Análisis laboratorio		274,000	0.064
Mantenimiento		1,275,000	0.30

Insumo	Consumo anual	Importe anual \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Personal de O & M		3,672,000	0.86
Total		14,952,420	3.51

Energía eléctrica consumo anual expresado en KWH; cloro, polímero para espesado y polímero para desaguado, en kg; acarreo de lodo, en toneladas.

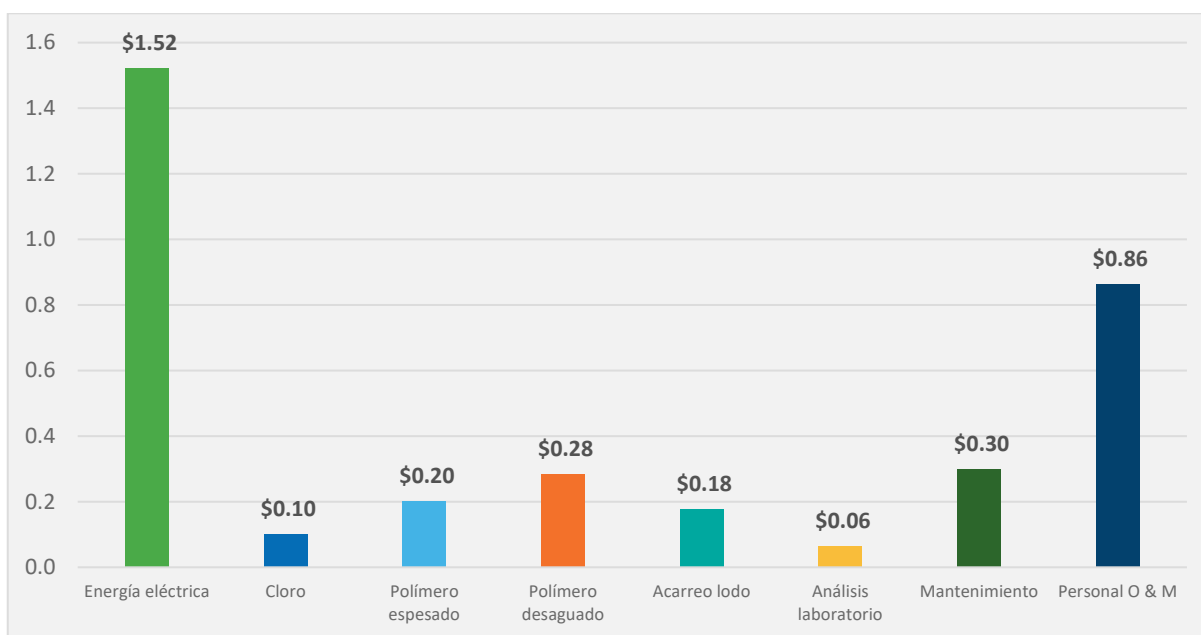


Figura 21 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m³

El importe anual de operación y mantenimiento estimado en esta sección es de 14.95 millones de pesos, con un costo unitario de O & M de 3.51 \$/m³ de agua tratada

Al comparar el importe estimado anual de O & M con el importe reportado por Aguakan, de 13.04 millones de pesos, se tiene una excedencia de 1.91 mdp's en el costo estimado con respecto al reportado, que representa $\approx 15\%$. La diferencia de costos se considera dentro de un margen razonable, dados los criterios y premisas generales con las que se estimó el costo de O & M de la PTAR Sur.

Por lo antes expuesto, se considera que el costo de O & M reportado por Aguakan es adecuado y refleja las condiciones de operación y mantenimiento observadas en las visitas efectuadas a la planta, así como en la evaluación de la calidad de agua tratada producida.

Observaciones y recomendaciones generales

A continuación se presentan las observaciones y recomendaciones que se desprenden de la evaluación de la información proporcionada por Aguakan y del diagnóstico en campo y gabinete de la PTAR Sur:

1. Se requiere incorporar la etapa de remoción biológica de fósforo para asegurar el no exceder el límite permisible.
2. Se requiere ampliar el volumen de la etapa preanóxica y el caudal de recirculación interna para no exceder el límite permisible de nitrógeno. Debido a que la etapa preanóxica y la recirculación de licor mezclado se diseñaron para no exceder el límite máximo de 25 mg/L de nitrógeno total.

Este valor es el límite permisible promedio mensual establecido para descargas a Ríos, arroyos, canales, drenes, Zonas marinas mexicanas y estuarios, en el proyecto de modificación PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017, que se publicó en el DOF el 5 de enero de 2018, año en que se elaboró el proyecto ejecutivo de la PTAR Sur.

3. Ampliar a corto / mediano plazo la capacidad de tratamiento de agua de la PTAR, ya que el caudal medio actual es $\approx 75\%$ de la capacidad de diseño, y da servicio a una zona urbana con crecimiento explosivo.
4. Se requiere equipar el módulo existente de obra civil de pretratamiento, y la construcción del segundo clarificador, el clarificador se requiere a corto plazo ya que se diseñó para una concentración de SSTLM menor a la que opera el reactor.
5. El futuro clarificador se deberá diseñar con profundidad de pared lateral mayor que la del actual, ya que los objetivos de calidad de agua tratada son ahora más estrictos.
6. Asimismo, para liberar el reactor que actualmente se utiliza como digestor aerobio de lodos se requiere construir y equipar el digestor de lodos.
7. Evaluar la conveniencia de recibir de manera líquida el lodo crudo proveniente de la PTAR Caribe.
8. Incorporar a mediano plazo la sedimentación primaria, ya que el Plan Maestro de la planta señala que la digestión de lodos será de tipo anaerobio.
9. Mantener en operación el filtro biológico en modalidad de alta tasa o desbaste, para mantener los beneficios del ahorro de energía eléctrica y no remover materia orgánica en exceso, que se requiere en la etapa preanóxica.
10. Evaluar la conveniencia de incorporar filtración terciaria, ya que la planta se localiza en un área urbana con alto potencial para aprovechar el agua en riego de áreas verdes.

11. La sustitución a mediano plazo de la desinfección con gas cloro, por desinfección con lámparas ultravioleta, una vez que se evalúe su funcionamiento y desempeño en las plantas que actualmente se están construyendo (Norponiente II y Paraíso).



2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Se incluye en el plan de acciones las mejoras y la construcción y equipamiento de las unidades requeridas para ampliar la capacidad actual de 200 litros por segundo a 400 L/s. Se requiere ampliar la capacidad de la planta a corto y mediano plazo.

El Plan Maestro prevé la construcción de un digestor anaerobio y sistemas periféricos, lo que liberaría el digestor aerobio “provisional” como reactor de lodos activados, aumentando la capacidad de esa etapa a 400 L/s.

La PTAR Sur cuenta con la infraestructura para recibir los lodos de la PTAR Caribe espesados y desaguados, sin estabilizar, para efectuar su manejo y digestión conjunta con los lodos de la propia planta.

En la Tabla 15 se presenta el resumen de las acciones propuestas para que la planta pueda cumplir con las especificaciones y límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para las descargas a suelo cárstico.

Tabla 15:
Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Sur

Etapas de Tratamiento	Sur
TREN DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	Existente, se amplía capacidad
Regulación agua cruda/pretratada	No aplica

Etapa de Tratamiento	Sur
Sedimentación primaria	Se incorpora
Filtro biológico	Se decomisiona a mediano plazo
Biológico remoción DBO	Existente Se incorpora clarificador secundario y aumenta capacidad de bombeo de recirculación y purga
Biológico remoción de fósforo	Se incorpora
Biológico remoción nitrógeno	Existente, se amplía volumen y caudal de recirculación
Filtración terciaria	Futuro, en caso de reúso de agua tratada
Desinfección	Cloro gas, existente (UV a mediano plazo)
TREN DE LODO	
Espesado	Existente
Digestión aerobia	El digestor aerobio provisional se habilita como reactor de lodos activados
Digestión anaerobia	Se incorpora, con aprovechamiento de biogás en cogeneración
Desaguado	Existente

En la Tabla 16 se presenta la descripción y características de las acciones propuestas de rehabilitación, mejoramiento o incorporación de etapas y/o equipos para la PTAR Sur.

Tabla 16:
Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Sur

Etapa de tratamiento	Sur
TREN DE AGUA	
Pretratamiento	1. El equipamiento electromecánico requerido para ampliar la capacidad de tratamiento
Tratamiento Primario	1. Se incorpora sedimentador primario para operar en paralelo con filtro biológico existente, Se generará lodo adecuado para digestión anaerobia
Tratamiento Secundario	1. Incorporar tanque anaerobio para remoción biológica de fósforo, o Efectuar precipitación química de fósforo en clarificador secundario o, de manera temporal, en tanque de contacto de cloro. 2. Aumentar el volumen de la sección anóxica del reactor existente, adosando volumen adicional junto al tanque anaerobio. 1. Aumentar la recirculación interna para remoción y cumplimiento del Nitrógeno Total.
Clarificación Secundaria	1. Clarificación en el tanque existente 1. Requiere el segundo clarificador para ampliar capacidad de tratamiento a 400 L/s,
Tratamiento Terciario	1. Filtración terciaria, en caso de reúso de agua tratada Tipo disco/tambor parcialmente sumergido, o de marco fijo, con claro de malla < 20 micras
Desinfección	1. Se utiliza la caseta de cloración y el tanque de contacto de cloro existentes
TREN DE LODO	
Espesamiento de lodos	1. No requiere acciones

Etapa de tratamiento	Sur
Digestión de lodos	1. No requiere acciones, continua de manera provisional la digestión aerobia en el segundo reactor de lodos activados existente. 1. Para ampliar la capacidad de tratamiento a 400 L/s se requiere construir digestor anaerobio para liberar el reactor de lodos activados que actualmente se utiliza como digestor aerobio 2. Se incorpora tratamiento de biogás, gasómetro, y sistema de cogeneración
Desaguado de lodos	1. No requiere acciones
Secado adicional de lodo desaguado	1. Actualmente se envían al patio de la PTAR Norponiente 1. El proyecto ejecutivo y Plan Maestro prevén la construcción de patio cubierto para secado adicional
TEMAS VARIOS	1. Incorporar medición en línea de Nitratos y Nitrógeno amoniacal para mejor control de proceso. 2. Se deberán efectuar las inversiones requeridas para la segunda etapa de la PTAR acorde a lo establecido en el Plan Maestro.

En la Figura 22 se presenta el diagrama de flujo del tren de tratamiento de agua y lodos de la PTAR Sur incorporando las acciones propuestas para que la planta produzca agua tratada que cumpla con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas a suelo cárstico.

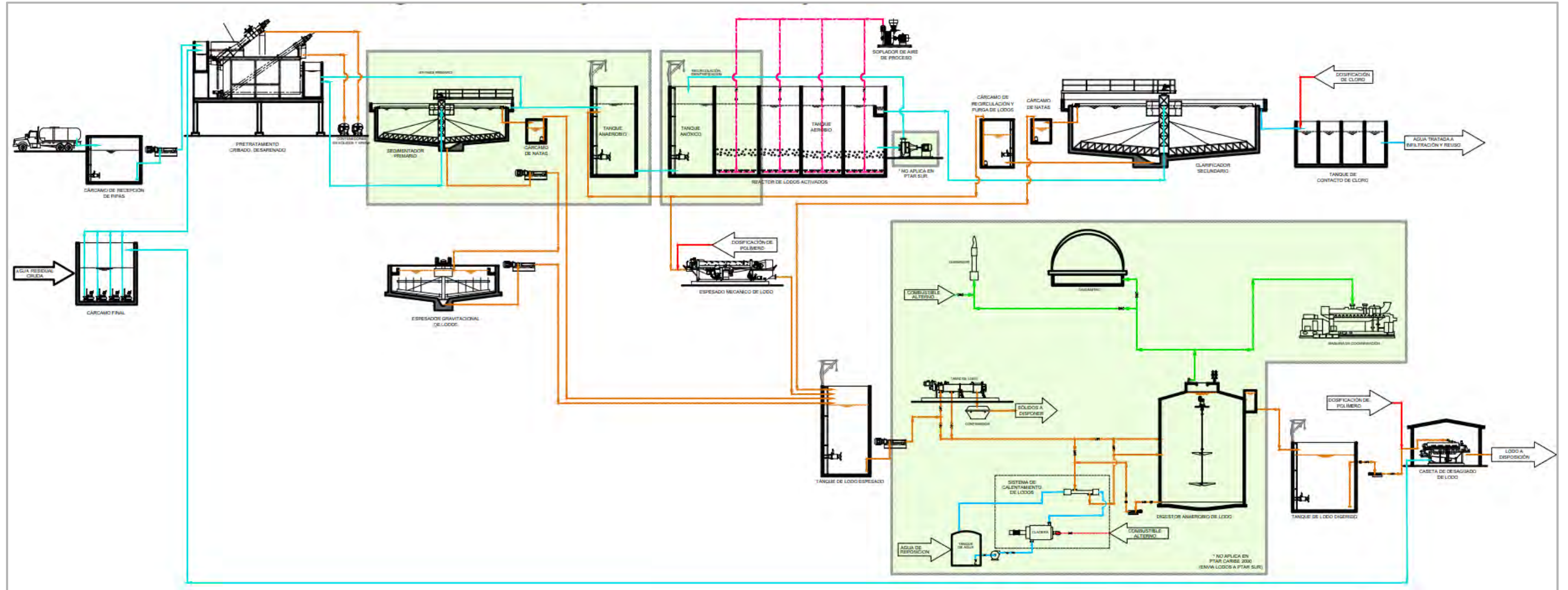


Figura 22 Diagrama de flujo de la PTAR Sur con las acciones propuestas (sombreado en verde)

Three decorative wavy lines in green, blue, and grey are positioned on the left side of the page, above the section header.

3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el procedimiento realizado para la estimación de costos de las acciones necesarias por ejecutar para que la PTAR Sur cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; en dicho presupuesto se incluye el costo de obra civil, electromecánica, eléctrica, instrumentación y control para obra nueva o ampliaciones, rehabilitación de obras existentes y proyecto ejecutivo y supervisión de obra y proyecto ejecutivo.

Las acciones de mejora surgen de la visita y diagnóstico técnico que se presenta previamente, así como de las entrevistas e información recabada con las áreas responsables de la operación y gestión de los recursos para saneamiento.

Techo financiero

El techo financiero para la implementación de las acciones de mejora y rehabilitación de la PTAR, se realizó a partir de costos paramétricos, como lo indican los Términos de Referencia.

Para lo anterior se recurrió a costos base de unidades de proceso y equipamiento similares y de capacidad comparable con las necesidades de las PTAR que forman parte de este estudio, de igual manera dichos costos son ajustados de acuerdo a la capacidad necesaria.

En la Tabla 17 se muestran los costos base por unidad de proceso, los cuales corresponden al

costo de mercado establecido en proyectos realizados en el año 2021 y 2022 en Quintana Roo, en plantas de tratamiento con proceso de remoción biológica de nitrógeno y fósforo, así como equipamiento electromecánico y de proceso, tanto de tipo convencional como relativamente nuevo en la región, como es la filtración terciaria y la desinfección con lámparas ultravioleta.

Tabla 17:
Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio

Unidad de proceso	Costo base en MDP
Tren de Tratamiento de Agua	
Pretratamiento mecánico	20.97
Regulación agua cruda/pretratada	12.65
Sedimentación primaria	13.12
Caja distribuidora agua primaria	0.99
Filtro biológico	
Biológico remoción DBO	22.99
Biológico remoción de fósforo	2.50
Biológico remoción nitrógeno	5.75
Clarificación secundaria	14.80
Recirculación y purga de lodo	6.89
Filtración terciaria	12.12
Desinfección	10.49
Pozo de infiltración	1.60
Tren de Tratamiento de Lodo	
Espesado de lodo	7.79
Digestión aerobia	16.09

Unidad de proceso	Costo base en MDP
Digestión anaerobia	59.55
Tanque de lodo digerido	3.77
Desaguado de lodo	17.43
Cogeneración	18.81

Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con las acciones a realizar en la PTAR se estimaron los costos de inversión, esto de acuerdo con los costos base y el factor de ajuste, los cuales están relacionado con el caudal de tratamiento.

A continuación se describe el procedimiento aplicado a cada planta de tratamiento (identificada como PTAR "n") para establecer el techo financiero preliminar de los recursos económicos requeridos para implementar el plan de acciones:

1. Los costos de referencia de las unidades de proceso se ajustaron a valores de noviembre de 2022 con el factor de actualización que resulta de dividir el INPC de noviembre entre el INPC del mes en que se originó el presupuesto.

A manera de ejemplo, a continuación se describe el procedimiento:

- Fecha del presupuesto de la unidad de proceso o PTAR de referencia: octubre de 2021.

- Valor del INPC en octubre de 2021: 115.561

- Valor del INPC de noviembre de 2022: 125.997

- Factor de actualización costo de referencia: $125.997/115.561 = 1.090$

2. El costo de referencia del proceso de digestión anaerobia y del sistema de cogeneración se determina con base en un digestor anaerobio con sistemas periféricos; tamizado de lodo, tratamiento lateral de la corriente de desaguado de lodo anaerobio; antorcha de quemado de biogás, gasómetro para almacenar el biogás generado, acondicionamiento de biogás; caseta de equipos de digestión y sistema de cogeneración.

En la siguiente tabla se presenta el desglose y capacidad de los componentes de las etapas de digestión anaerobia de lodos y del sistema de cogeneración:

Etapa de Digestión Anaerobia de Lodo

Concepto	Importe actualizado, mdp
Tamizado de lodo (capacidad para 5 L/s de lodo espesado al 5%)	1.22
Digestor anaerobio mesofílico (de 5 700 m ³)	43.25
Gasómetro de membrana y periféricos (de 1.000 m ³)	6.14
Quemador de biogás y periféricos (capacidad para 225 m ³ /h)	1.59
Edificios operativos	2.71
Tratamiento lateral del agua retirada en desaguado de lodo	4.64
Subtotal	59.55
Obra eléctrica (12 % del subtotal)	7.44
Control (3 % del subtotal + obra eléctrica)	2.01
Contingencias (8 % del subtotal + obra eléctrica + control)	5.52
Total	74.53

Sistema de Cogeneración

Concepto	Importe actualizado, mdp
Sistema de tratamiento de biogás (capacidad para 225 m ³ /h) para remoción de humedad, impurezas y H ₂ S	7.10
Sistema integral de cogeneración (capacidad de 500 kW eléctricos)	11.72
Total	18.81

El costo actualizado de las unidades de proceso se ajustó posteriormente en función de la capacidad (a caudal medio) de las unidades de proceso de la PTAR "n", en relación con la capacidad de la PTAR de referencia, acorde a lo siguiente:

$$\text{Costo PTAR "n"} = \text{Costo PTAR de referencia} * ((\text{Tamaño PTAR "n"} / \text{Tamaño PTAR referencia})^{0.70})$$

La capacidad de la PTAR de referencia es para un caudal promedio de 150 L/s.

A manera de ejemplo, al utilizar la ecuación anterior, y considerando que la PTAR "n" es de 350 L/s de capacidad, se obtiene un multiplicador de 1.81, mismo que se aplica sobre el importe de las unidades de proceso de la PTAR de referencia.

De esta forma, en lugar de ajustar el costo de la PTAR "n" con una relación lineal entre el tamaño de ambas plantas (2.33), el criterio toma en cuenta que el costo unitario de inversión (\$ por L/s de capacidad) disminuye al aumentar el tamaño de la unidad de proceso y/o de la PTAR.

Este procedimiento de ajuste de costo se utilizó en las unidades de proceso cuyo dimensionamiento está determinado por la capacidad y carga hidráulica, como es el caso de las etapas que a continuación se indican:

- Pretratamiento (cribado y desarenación)
- Regulación y/o bombeo de agua cruda/pretratada
- Sedimentación primaria
- Caja distribuidora agua primaria
- Clarificación secundaria
- Recirculación y purga de lodo
- Filtración terciaria
- Desinfección
- Tanque de lodo digerido

Asimismo, el procedimiento de ajuste de costo descrito en este numeral también es aplicable en los procesos biológicos de tratamiento de agua y en las operaciones y procesos del tren de tratamiento de lodos, cuando en la PTAR "n" se presenta la condición de carga influente orgánica y de sólidos que se describe en el siguiente numeral.

3. El factor de ponderación arriba referido se utiliza de manera directa si la carga contaminante influente a la PTAR "n", expresada como la concentración promedio de la DBO y SST en el agua residual cruda, es comparable a la de ($\leq 20\%$) la PTAR de referencia.

La concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente a la PTAR de referencia es 350 mg/L.

Se considera que el agua residual influente a la PTAR "n" es comparable al agua residual de la PTAR de referencia, cuando la concentración promedio de DBO y SST está en el rango de $\pm 20\%$ a la concentración indicada en el párrafo previo.

4. A continuación se enlistan las operaciones y procesos del tren de tratamiento de agua y de lodos que, en caso de variación mayor al 20 % en la concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente, estarían sujetos a ajuste de costo adicional al ya aplicado en el numeral 3.
 - Filtro rociador

- Reactor de lodos activados, remoción DBO
- Reactor de lodos activados, remoción de fosforo
- Reactor de lodos activados, remoción nitrógeno
- Espesado de lodo
- Digestión aerobia
- Digestión anaerobia
- Desaguado de lodo

En los casos en que la calidad del agua residual influente a la PTAR "n" tiene una variación superior al 20%, hacia arriba o hacia abajo, se procedió a aplicar un ajuste adicional al costo de inversión en las operaciones y procesos del listado inmediato previo.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual influente es $\approx 30\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.05 o 0.90, según corresponda.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual es $\approx 40\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.12 o 0.80, según corresponda.

5. Se aplicó un factor de ponderación para los casos en que la actividad propuesta no es una unidad de proceso nueva y completa, es decir que consiste en la rehabilitación, mejoramiento o complemento de capacidad de una etapa de proceso o unidad existente.

El valor del factor de ponderación asignado en estos casos está en el rango de 0.35 a 0.65, a criterio del especialista, en función del grado de intervención que se requiere para la unidad de proceso en cuestión.

En términos generales, los valores cercanos al límite inferior del rango se aplicaron cuando la acción implicaba rehabilitación civil única o principalmente; los valores cercanos al límite superior se aplicaron cuando la intervención implica también reequipamiento electromecánico.

6. Una vez establecido el importe de inversión por planta de las principales unidades del tren de tratamiento de agua y de lodos, para determinar el importe de otros componentes de la PTAR a dicho importe se aplicó un valor seleccionado de los rangos de porcentaje que a continuación se indican:

Equipo menor:	5 % a 8 %
Vialidades, patios y obras exteriores:	1 % a 5 %
Obra eléctrica:	10 % a 15 %
Automatización y control:	3 % a 5 %

Imprevistos y contingencias:

8 % a 12 %

7. El importe por elaboración del proyecto ejecutivo de las acciones propuestas por planta se determinó a partir de un porcentaje, en el rango del 1.2 % al 3.5 %, mismo que se aplicó sobre el importe total estimado.
8. El costo de la supervisión de la ejecución y puesta en marcha de las obras y equipamiento propuestas en el Plan de Acciones por planta, se estableció aplicando un porcentaje del 3.5 % sobre el importe total estimado, sin incluir los importes correspondientes al costo del proyecto ejecutivo y de capacitación.

Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares

La selección de la digestión anaerobia como proceso de tratamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, orientado a la generación de biogás para su aprovechamiento, o bien la opción de instalar paneles solares en estas plantas, ha sido justificada mediante criterios técnicos específicos. Estos criterios incluyen la capacidad operativa de las plantas, la disponibilidad de espacio físico y las propiedades de la carga orgánica influente. En particular, en el caso de las PTAR ubicadas en el Estado de Quintana Roo, el contexto local en que se encuentra cada planta cobra especial relevancia, dado que las condiciones geográficas, ambientales y de infraestructura turística pueden influir en la viabilidad y eficiencia de cada tecnología implementada.

Este análisis permite una decisión fundamentada, buscando optimizar tanto el rendimiento energético como el aprovechamiento sostenible de los recursos locales.

Antecedentes

Como parte del diagnóstico para el mejoramiento de las PTAR de Quintana Roo mayores a 100 L/s, la digestión anaerobia se considera en las siguientes PTAR:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur que recibe también los lodos de la PTAR Caribe
4. PTAR Saas Tun Ha (a futuro, mediano plazo)

Adicionalmente, la instalación de paneles solares se considera en las siguientes PTAR, de las cuales las primeras tres son instalaciones existentes:

1. PTAR Norte

2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur
4. PTAR El Rey
5. PTAR Saas Tun Ha
6. PTAR San Miguelito
7. PTAR Bicentenario
8. PTAR Centenario

Digestión Anaerobia y Cogeneración

La digestión anaerobia es un proceso biológico mediante el cual los lodos residuales se descomponen en ausencia de oxígeno, generando biogás. El biogás, compuesto principalmente de metano, puede ser aprovechado para producir electricidad y calor mediante sistemas de cogeneración. Además de reducir el volumen de lodos, la digestión anaerobia permite un manejo más eficiente de los residuos, mejorando la sostenibilidad de las plantas al aprovechar el potencial energético del metano.

Los principales aspectos considerados para proponer digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás en las PTAR se presentan en seguida. Todos fueron considerados en conjunto para cada planta.

Condiciones climáticas

La temperatura está relacionada con la velocidad de las reacciones químicas. En el diseño de la digestión anaerobia, la temperatura aumenta la velocidad de hidrólisis y de formación de metano, además disminuye el mínimo tiempo de retención requerido para llegar a una destrucción de sólidos aceptable (38 % en SSV).

Para un proceso mesofílico, que es el seleccionado para las PTAR de Quintana Roo, las temperaturas óptimas se encuentran entre los 30 y 38°C (Metcalf & Eddy, 2014), lo cual es fácilmente alcanzado en la región, con temperaturas de agua residual alrededor de los 30°C todo el año. El no requerir un sistema para control fino de la temperatura es una gran ventaja de toda la zona.

Carga orgánica influente

Se requiere mantener cierta carga orgánica para mantener el equilibrio entre los microorganismos que realizan la digestión anaerobia y mantener una producción de biogás constante. La carga orgánica alimentada al digestor proviene de la fracción de SSV en los lodos generados en el proceso primario y/o secundario y éstos a su vez dependen de las características del agua residual.

En general, la carga orgánica influente necesaria proviene de un análisis detallado del proceso para cada caso, sin embargo, existen lineamientos con reglas generales para anticipar este resultado. En el caso de las PTAR de Quintana Roo, se consideraron para digestión anaerobia

las PTAR que en su operación actual o a capacidad plena, recibieran más de 300 L/s o carga orgánica igual o mayor a 7.5 ton DBO/d, esto de acuerdo con estudios técnicos realizados previamente por GIZ (GIZ México, 2017).

Toxicidad

La digestión anaerobia es un proceso sensible a variaciones de pH y puede verse afectada por la presencia de ciertas sustancias inhibidoras en las aguas residuales. Para la instalación de una nueva PTAR, es fundamental realizar análisis previos para descartar la presencia de estos compuestos que puedan interferir en el proceso. En el presente caso, dado que las PTAR evaluadas ya están en operación, se ha verificado que en los sitios propuestos para la digestión anaerobia no se han registrado historiales de inhibiciones significativas al proceso biológico, lo que garantiza su viabilidad.

Volumen y tipo de lodos generados

Una de las principales ventajas de la digestión anaerobia es la generación de biogás, siendo más eficiente esta generación cuanto mayor es la carga orgánica en los sólidos alimentados. En los sitios propuestos, además de lodos secundarios, se procesan lodos primarios con alto contenido de SSV, lo que incrementa la generación de biogás. Las altas cargas orgánicas influentes a las plantas aseguran buena generación de sólidos, maximizando la eficiencia del sistema de digestión.

Disponibilidad de espacio

Los sitios con propuesta de digestión anaerobia fueron revisados para la disponibilidad de espacio para una unidad de digestión anaerobia junto con gasómetro e instalaciones de cogeneración y manejo de biogás.

Disponibilidad operativa

La digestión anaerobia es una unidad significativamente más compleja que las demás en el tren de tratamiento, lo que demanda mayor capacidad técnica y un personal operativo especializado para su correcta operación a lo largo de la vida útil de la PTAR. En las plantas propuestas, se considera que cuentan con el personal y la capacidad técnica necesarios para implementar y mantener este proceso de manera eficiente.

Viabilidad operativa

Con base en la calidad de agua, la temperatura, el caudal influente y el tipo de proceso, es posible estimar la cantidad de lodos producidos en cada PTAR. Los lodos producidos son la base para estimar el tamaño ideal del digestor anaerobio. De acuerdo con la literatura (Metcalf & Eddy, 2014) el tiempo de retención recomendado para los lodos a 30°C es de 6 a 14 días y la carga orgánica puede variar entre los 1.6 y 4.8 kg SSV/m³ d.

A manera de ejemplo, con el volumen de 5,700 m³/d y a una carga de 2.4 kg SSV/ m³ d sería

posible alimentar hasta 13.7 toneladas al día de lodo. Este flujo másico a una concentración de 3.5 % en sólidos tendría un tiempo de residencia de 14.6 días. La producción de lodo actual de las PTAR seleccionadas para digestión anaerobia varía entre 6.7 y 9.9 toneladas al día, y puede ser aún mayor de acuerdo con la capacidad de tratamiento de agua residual instalada. El volumen seleccionado considera este crecimiento además de las necesidades actuales.

Conclusiones para biogás y cogeneración

Los aspectos anteriores se analizaron y forman parte del análisis de costo presentado. En general en las PTAR seleccionadas es positiva la presencia de la digestión anaerobia. En resumen, para seleccionar las PTAR donde es viable instalar digestión anaerobia se consideró que:

1. La temperatura de la zona es favorable con 30°C.
2. La carga orgánica influente a las PTAR y/o el caudal se encuentran en el umbral de 7.5 ton/d de DBO o 300 L/s de caudal tratado.
3. Los procesos biológicos existentes no presentan obstáculos por sustancias inhibidoras.
4. La presencia de lodo primario favorece la producción de biogás.
5. Existe suficiente espacio para la instalación de las unidades respectivas.
6. Existe suficiente personal operativo y capacidad técnica para mantener la unidad funcionando eficientemente.
7. El volumen seleccionado como base para los costos cubre los rangos de operación actuales y futuros de cada PTAR.
8. En el balance económico, la producción y aprovechamiento del biogás es un instrumento importante para hacer viable la operación de las PTAR más grandes.

Generación de Energía Solar

A diferencia de la digestión anaerobia, la instalación de paneles solares es un proceso más sencillo y viable para prácticamente cualquier PTAR. El criterio principal para su implementación fue la disponibilidad de espacio en la planta y su tamaño, siendo seleccionadas aquellas de mediana o gran escala.

Las plantas que no tienen suficiente carga orgánica para justificar la digestión anaerobia, pero disponen de amplias áreas, pueden aprovechar los paneles solares para reducir su dependencia de la red eléctrica y generar energía renovable de manera sostenible. En consecuencia, esta tecnología se considera para casi todas las PTAR.

El costo de implementación de ambas tecnologías no es equivalente, siendo la digestión anaerobia considerablemente más costosa. Sin embargo, como se muestra en el análisis económico, la generación de biogás a escalas superiores al umbral establecido por la GIZ produce una cantidad significativa de energía eléctrica, generando importantes ahorros a largo plazo. Además, la digestión anaerobia requiere una mayor capacidad técnica para su operación. En contraste, los paneles solares, más sencillos de instalar y mantener, representan

una opción accesible y conveniente para todas las PTAR.

A continuación se presenta una tabla resumen con los principales criterios utilizados para la selección de digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás, así como para la instalación de paneles solares.

			Principales Criterios para selección de Digestión Anaerobia					Criterio de selección para la instalación de Paneles Solares	
Nombre de la planta	Capacidad instalada (L/s)	DBO entrada (mg/L)	Carga orgánica influente (Ton DBO / día)	Carga orgánica > 7.5 ton / día	Sedimentación primaria (Lodo primario)	Disponibilidad operativa	Digestión Anaerobia	Espacio disponible	Paneles solares
Poligono Sur	200	343		SI	SI, se incorpora	SI	SI	SI	SI

Resumen de inversión, techo financiero

En la Tabla 18 se muestra el monto de inversión por unidad de proceso o componente de proyecto, y en la Figura 23 se muestra su distribución porcentual.

Tabla 18:
Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Etapa o componente		Importe PTAR Sur, mdp's
Proyecto ejecutivo		2.50
Bombeo / regulación / pretratamiento / primario		27.49
Remoción DBO y nutrientes, desinfección		29.49
Tratamiento terciario		--
Tren de tratamiento de lodos		--
Digestión anaerobia		59.55
Cogeneración		18.81
Paneles solares		--

Etapa o componente	Importe PTAR Sur, mdp's
Equipo menor	6.77
Terracerías, vialidades, patios	5.41
Obra eléctrica	16.92
Automatización y control	4.06
Imprevistos y contingencias	10.83
Supervisión	6.29
Capacitación	0.40
Total	188.53

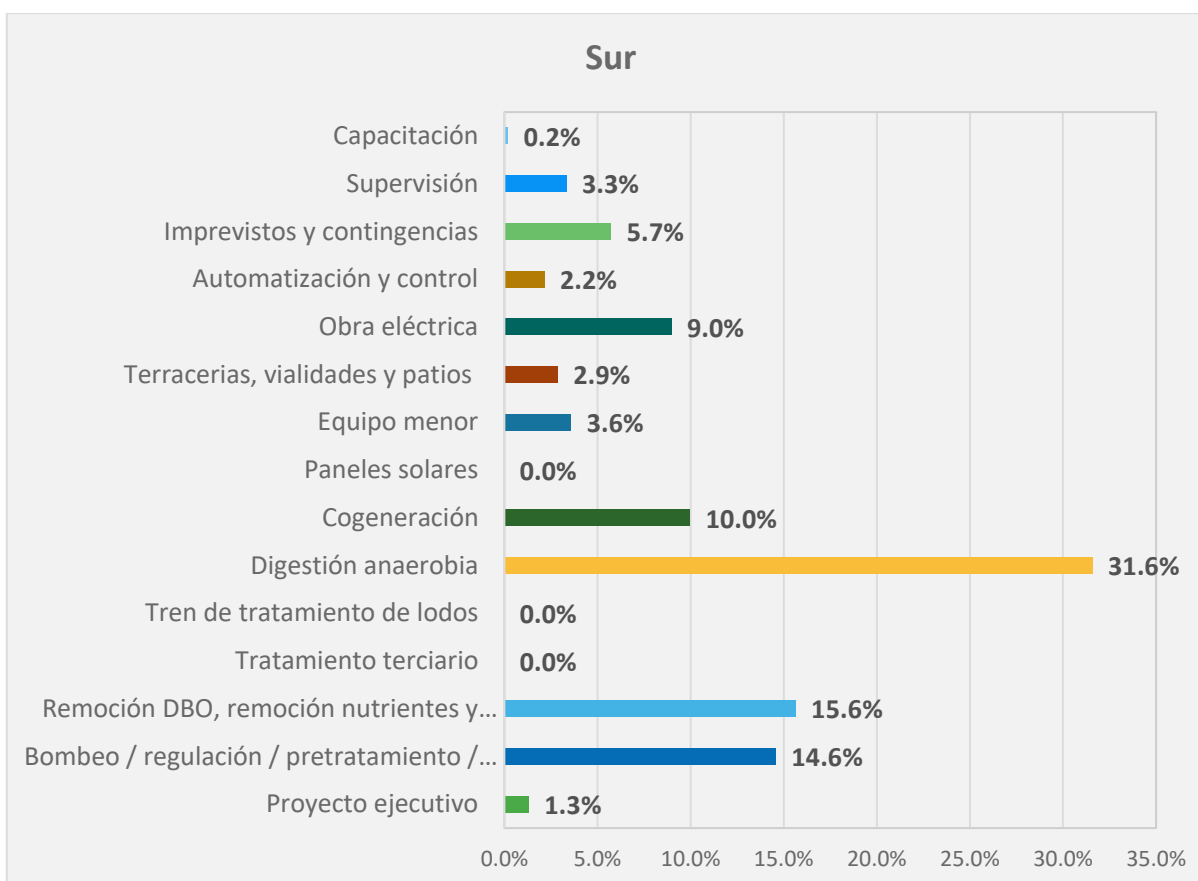


Figura 23 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

En la Tabla 19 se muestra el resumen del techo financiero total.

Tabla 19:
Monto de inversión, millones de pesos

PTAR	Capacidad instalada, L/s	Capacidad propuesta, L/s	Inversión requerida	Inversión Digestión Anaerobia	Inversión Cogeneración	Inversión Paneles solares	Inversión Total	Inversión unitaria, k\$/lps
Sur	200	400	90.5	74.53	23.54	--	188.5	471

A continuación, se muestra la estimación detallada de costos, se describe la unidad de proceso, el factor de ajuste integrado y monto de inversión estimado, así como los porcentajes aplicados a las obras complementarias: vialidades, obra eléctrica, de control e instrumentación, imprevistos, proyecto ejecutivo, supervisión y capacitación.

Tabla 20:
Estimación detallada de costos PTAR Sur

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tren de Tratamiento de Agua		
Pretratamiento mecánico	0.60	12.50
Regulación agua cruda/pretratada		
Sedimentación primaria	0.99	13.04
Caja distribuidora agua primaria	1.99	1.96
Filtro biológico		
Biológico remoción DBO		
Biológica remoción de fósforo	1.99	4.97
Biológico remoción nitrógeno	0.99	5.71
Clarificación secundaria	0.99	14.70
Recirculación y purga de lodo	0.60	4.11
Filtración terciaria		
Desinfección		
Pozos de infiltración		
Tren de Tratamiento de Lodo		
Espesado		
Digestión aerobia		
Digestión anaerobia	1.0	59.55

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tanque de lodo digerido		
Desagüado		
Cogeneración	1.0	18.81
Subtotal		135.35
Equipo menor	5.0%	6.77
Terracerías, vialidades y patios	4.0%	5.41
Obra eléctrica	12.5%	16.92
Automatización y control	3.0%	4.06
Imprevistos y contingencias	8.0%	10.83
Proyecto ejecutivo		2.50
Supervisión		6.29
Capacitación		0.40
Total		188.53

4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el programa de inversiones necesarias por ejecutar para que la PTAR cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; este programa abarca del año 2023 al año 2027.

Este programa de inversiones es el resultado de las acciones propuestas para mejorar la calidad del agua tratada de las PTAR con capacidad de tratamiento igual o mayor a 100 l/s en

el estado de Quintana Roo, así como el presupuesto derivado del plan de acciones. La programación de las inversiones se basa en las necesidades propias de cada planta considerando el objetivo principal, que es el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

El 5 de diciembre de 2022 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación los:

LINEAMIENTOS que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Los Lineamientos constan en total de veintitrés artículos, más un artículo transitorio, así como el denominado Anexo A: Instructivo para la Información Requerida en el Sistema.

Los Lineamientos están estructurados en seis capítulos:

- Capítulo Primero, Disposiciones Generales
- Capítulo Segundo, Requisitos para la Presentación y Registro de los Programas para el Cumplimiento
- Capítulo Tercero, De los Plazos de los Programas para el Cumplimiento
- Capítulo Cuarto, Procedimiento para la presentación, registro y revisión de los Programas para el Cumplimiento, así como del Informe de Avances
- Capítulo Quinto, De las Verificaciones
- Capítulo Sexto, De las Sanciones

Aspectos Clave de los Lineamientos

Artículo 2. Sujeto Regulado: El responsable de descargas de aguas residuales al que resulte aplicable la NOM-001-SEMARNAT-2021, quien podrá presentar sus Programas para el Cumplimiento ante la Comisión.

Artículo 5. La presentación del Programa para el Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, **es de naturaleza voluntaria**, por lo que, en caso de su incumplimiento, el responsable

de la descarga de aguas residuales en cualquier cuerpo receptor propiedad de la nación, quedará sujeto a los plazos establecidos en la mencionada Norma Oficial Mexicana

Artículo 6. El Sujeto Regulado presentará su Programa para el Cumplimiento, en los siguientes supuestos:

- a) Cuando **deba modificar sus instalaciones** con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como el Apéndice Normativo de la NOM-001-SEMARNAT-2021, y que los ajustes y acciones que se deban ejecutar de acuerdo a los estudios realizados por dicho Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor, en el Artículo 2o Transitorio de la NOM, o bien,
- b) Que el Sujeto Regulado **deba modificar los procesos productivos de las actividades que generan la descarga de aguas residuales**, con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como al Apéndice Normativo y que dichas modificaciones, de acuerdo con los análisis o la evidencia del Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor.

Artículo 7. El Sujeto Regulado, en caso de presentar el Programa para el Cumplimiento lo hará por cada uno de los puntos autorizados en su Permiso de Descarga, y que, para cumplir con las disposiciones establecidas en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se ubiquen en alguno de los supuestos establecidos en el Artículo 6 de los Lineamientos.

Artículo 8. Una vez registrado el Programa para el Cumplimiento, y en tanto este se encuentre vigente, en concordancia con el Artículo 5º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, el Sujeto Regulado deberá cumplir, además de lo comprometido en el Programa, con los límites y parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, para gozar de los beneficios e incentivos que para tales efectos establezca la LFD vigente.

Artículo 10. El Programa para el Cumplimiento, contendrá:

- Nombre, denominación o razón social del Sujeto Regulado;
- RFC del Sujeto Regulado;
- Datos de identificación del Permiso de Descarga; Volumen de descarga; Datos del medidor o dispositivo de medición de las aguas residuales descargadas; Coordenadas del punto de descarga;
- Datos generales del representante legal; Correo electrónico;
- Justificación de la solicitud para la aplicación del Programa para el Cumplimiento;
- Cronograma de actividades para las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento; Periodo solicitado;
- E-Firma del Sujeto Regulado o representante legal.

Artículo 12. Los Programas para el Cumplimiento deberán presentarse ante la CONAGUA, por el Sujeto Regulado **a partir de que entre en vigor la NOM-001-SEMARNAT-2021 y hasta el 3 de abril del 2023.**

El Sujeto Regulado que no presente su Programa para el Cumplimiento en el periodo señalado, se sujetará a los plazos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 13. Los plazos que se establezcan en el Cronograma de Actividades para el seguimiento de las acciones comprometidas en los Programas para el Cumplimiento **no deberán rebasar el 11 de marzo de 2027.**

Artículo 15. La CONAGUA realizará revisiones aleatorias a los Programas para el Cumplimiento, podrá solicitar al Sujeto Regulado, las aclaraciones o información adicional que considere necesarias. En el supuesto de que el Sujeto Regulado no atienda el requerimiento de información dentro de los veinte días hábiles siguientes, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y será aplicable lo establecido en el Artículo 2º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 16. Una vez registrado el Programa ante la CONAGUA, no será objeto de modificación, salvo en el caso que el Sujeto Regulado justifique la necesidad de realizar algún cambio y no exceda el plazo originalmente establecido.

Artículo 17. El Sujeto Regulado debe presentar **dentro de los primeros cinco días hábiles de los meses de marzo y septiembre de cada año**, a partir de la fecha del registro, el avance de actividades mediante la carga de información que solicite el Sistema de Gestión en el apartado correspondiente al Informe de Avance del Programa para el Cumplimiento. Cuando el Sujeto Regulado no envíe en tiempo y forma la información del Informe de Avance, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y se aplicarán las disposiciones de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 21. La CONAGUA procederá a cancelar el Programa para el Cumplimiento y su registro, cuando compruebe que el Sujeto Regulado no ha cumplido con lo comprometido en el programa registrado. La CONAGUA, procederá a notificar la cancelación del Programa, por lo que quedarán sin efectos las acciones de cumplimiento propuestas por el Sujeto Regulado en su respectivo Programa, aplicándose las disposiciones correspondientes de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 22. Cuando las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento presentado impliquen la suspensión de sus procesos productivos y actividades para llevar a cabo las acciones tendientes a la conversión de procesos productivos o la instalación de maquinaria, equipos o plantas que se requieran para el cumplimiento de los parámetros y límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, y deba quedar fuera de operación el sistema de tratamiento de aguas residuales, el Sujeto Regulado deberá dar aviso a la CONAGUA, al menos 30 días hábiles antes de que esto ocurra, e indicar el periodo por el que prevalecerá dicha situación, el cual **no deberá exceder de tres meses**, y podrá presentarse

hasta un máximo de dos ocasiones durante la vigencia del Programa.

De llevar a cabo la suspensión de sus procesos de tratamiento de aguas residuales sin el aviso correspondiente se aplicarán las sanciones previstas. Una vez recibida la solicitud, el Sistema de Gestión emitirá el comprobante que acreditará que la solicitud fue hecha en tiempo y forma.

Artículo 23. En caso de incumplimiento a los compromisos establecidos en el Programa para el Cumplimiento, quedan sin efecto las prerrogativas que ampara dicho documento, por lo cual el Sujeto Regulado será acreedor a las sanciones que correspondan y, en su caso, estará obligado a efectuar el pago de los derechos por el uso y aprovechamiento de cuerpos receptores de descargas de aguas residuales propiedad de la nación, a partir de la fecha del incumplimiento, así como de aquéllos que se hubieren generado con anterioridad, con sus accesorios, conforme a la LFD vigente.

Programa de inversión anual

Como se mencionó anteriormente, el monto de inversión total del Plan de Acciones es de 188.53 millones de pesos (mdp), inversión a realizarse en 5 años a partir del año 2023 hasta marzo del 2027, acorde al plazo previsto en los Lineamiento que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el presente apartado se muestra el desglose anual del Plan de Acciones, donde se describe el monto de inversión por año y unidad de proceso y/o componente del proyecto programado, así como los importes anuales y acumulados y su porcentaje de participación en la inversión.

Tabla 21:
Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
A	Proyecto ejecutivo	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50
		100.0 %	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
B	Cárcamo, regulación,	0.00	13.75	13.75	0.00	0.00	27.49

Clav e	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
	pretratamiento, y/o tratamiento primario	0.0%	50.0 %	50.0%	0.0%	0.0%	100.0%
C	Tren de tratamiento de agua	0.00	8.85	20.64	0.00	0.00	29.49
		0.0%	30.0 %	70.0%	0.0%	0.0%	100.0%
D	Tratamiento terciario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
E	Tren de tratamiento de lodos	0.00	41.69	17.87	0.00	0.00	59.55
		0.0%	70.0 %	30.0%	0.0%	0.0%	100.0%
F	Cogeneración (y/o paneles solares)	0.00	0.00	0.00	15.99	2.82	18.81
		0.0%	0.0%	0.0%	85.0%	15.0%	100.0%
G	Equipo menor	0.12	3.16	2.57	0.79	0.14	6.77
		1.8%	46.6 %	37.9%	11.6%	2.0%	100.0%
H	Terracerías, vialidades y patios	0.10	2.52	2.05	0.63	0.11	5.41
		1.8%	46.6 %	37.9%	11.6%	2.0%	100.0%
I	Obra eléctrica	0.31	7.89	6.41	1.96	0.35	16.92
		1.8%	46.6 %	37.9%	11.6%	2.0%	100.0%
J	Automatización	0.07	1.89	1.54	0.47	0.08	4.06
		1.8%	46.6 %	37.9%	11.6%	2.0%	100.0%

Clav e	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
K	Imprevistos y contingencias	0.20	5.05	4.10	1.26	0.22	10.83
		1.8%	46.6 %	37.9%	11.6%	2.0%	100.0%
	Total anual y gran total, mdp's	3.41	87.93	71.52	21.82	3.85	188.53
	Acumulado anual, mdp's	3.41	91.34	162.8 6	184.6 8	188.53	
	Total anual y gran total, %	1.8%	46.6 %	37.9%	11.6%	2.0%	100%
	Acumulado anual, %	1.8%	48.4 %	86.4%	98.0%	100.0 %	

A continuación se muestra de manera gráfica el monto de inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR:

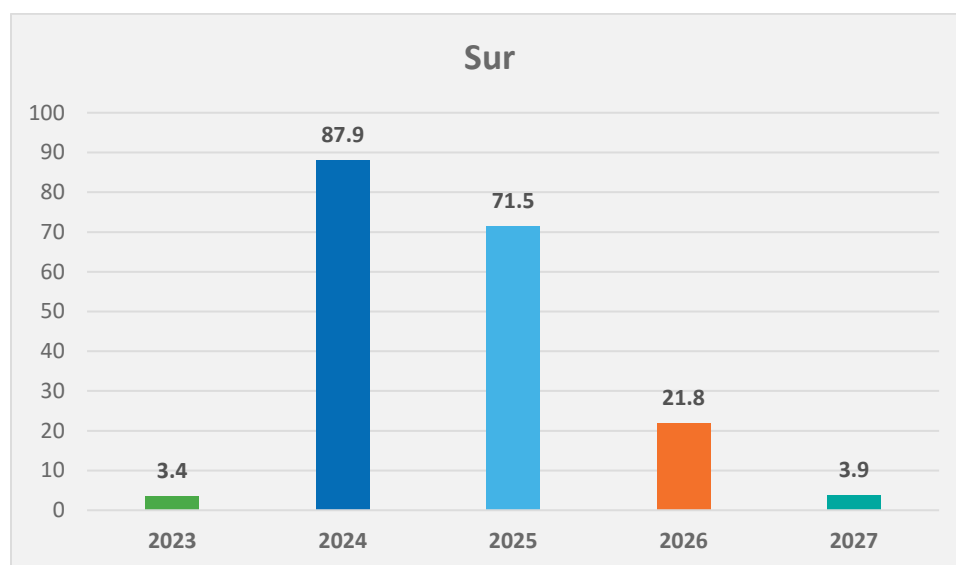


Figura 24 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Bibliografía

CONAGUA. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. . México: CONAGUA.

GIZ, C. A. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Mexico: GIZ.

Metcalf & Eddy / AECOM. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. NY: McGraw-Hill.

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4a ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.

US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR San Miguelito (Cozumel)

Contenido

PTAR San Miguelito	1
Contenido	4
Índice de Tablas	5
Índice de Figuras	7
1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más	9
Descripción general de la PTAR San Miguelito en Cozumel	9
Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases	10
Descripción general del proceso	11
Diagrama de flujo de proceso	12
Descripción de las unidades de proceso	13
Tren de Tratamiento de Agua	13
Tren de Tratamiento de Lodos	24
Estado de conservación y operación de las instalaciones	30
Análisis de calidad del agua cruda	33
Calidad de agua cruda, histórica	33
Calidad de agua cruda, de este Estudio	33
Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada	36
Calidad de agua tratada, histórica	36
Calidad de agua tratada, de este Estudio	38
Parámetros de operación del reactor de lodos activados	41
Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua	43

Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR	44
Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) de cada planta	44
Estimación de los costos de operación y mantenimiento	45
Observaciones y recomendaciones generales	49
2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	51
3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	58
Techo financiero	58
Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales	60
Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares	64
Resumen de inversión, techo financiero.....	68
4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	72
Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	72
Aspectos Clave de los Lineamientos	73
Programa de inversión anual	76
Bibliografía.....	79

Índice de Tablas

Tabla 1: Dimensiones Filtro Rociador.....	14
Tabla 2: Dimensiones Reactores de Lodos Activados PTAR San Miguelito.....	15
Tabla 3: Dimensiones Clarificadores Secundarios PTAR San Miguelito	15
Tabla 4: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua.....	22
Tabla 5: Dimensiones Digestor Aerobio de Lodo PTAR San Miguelito	25
Tabla 6: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de	

tratamiento de lodo	27
Tabla 7: Calidad de agua residual cruda (mg/L)	33
Tabla 8: Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente	35
Tabla 9: Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)	37
Tabla 10: Caracterización del agua tratada de este Estudio (<i>E.coli</i> y Huevos de helminto)	40
Tabla 11: Cumplimiento del agua tratada.....	41
Tabla 12: Oxígeno disuelto y Sólidos Sedimentables en reactor de lodos activados de la PTAR	42
Tabla 13: Coordinada de pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR.....	43
Tabla 14: Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales	46
Tabla 15: Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M.	47
Tabla 16: Resumen de las acciones propuestas para la PTAR San Miguelito	52
Tabla 17: Descripción de las acciones propuestas para la PTAR San Miguelito	53
Tabla 18: Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio	59
Tabla 19: Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	68
Tabla 20: Monto de inversión, millones de pesos.....	70
Tabla 21: Estimación detallada de costos PTAR San Miguelito.....	70
Tabla 22: Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado	76

Índice de Figuras

Figura 1 Vista Aérea PTAR San Miguelito en Cozumel	9
Figura 2 Arreglo general de unidades de la PTAR San Miguelito	12
Figura 3 Cárcamo de recepción de pipas e ingreso de agua residual a plataforma de pretratamiento	17
Figura 4 Carátula de medidor de caudal influente (fuera de servicio) y transductores para medición ultrasónica	17
Figura 5 Equipo Ro5 en vista lateral y superior	18
Figura 6 Criba rotatoria y descara de arenas	18
Figura 7 Filtro rociador	18
Figura 8 Estación de bombeo de recirculación y elevación del biofiltro	19
Figura 9 Reactor de lodos activados.....	19
Figura 10 Vista general de clarificador secundario y cámara central	19
Figura 11 Vertedores de clarificador con pastillas de cloro y apariencia de agua tratada	20
Figura 12 Tanque de contacto de cloro.....	20
Figura 13 Caseta de dosificación de cloro vacía.....	20
Figura 14 Pozo de infiltración cubierto de maleza	21
Figura 15 Cárcamo de agua para reúso y medidor de agua para reúso (inundado).....	21
Figura 16 Cárcamo de recirculación de lodo y cárcamo de natas.....	25
Figura 17 Digestor aerobio de lodos abandonado	26
Figura 18 Aspecto de la planta alta de la caseta de desaguado de lodos con equipos fuera de operación.....	26
Figura 19 Estructura para secado final de lodos y cárcamo de retorno	26
Figura 20 Caracterización del agua cruda (sep-2022)	34
Figura 21 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021).....	38
Figura 22 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT).....	39

Figura 23 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)	40
Figura 24 Prueba de sedimentabilidad PTAR San Miguelito	42
Figura 25 Pozos de infiltración PTAR San Miguelito	43
Figura 26 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m ³	48
Figura 27 Vista actual de la PTAR San Miguelito (Cozumel)	51
Figura 28 Diagrama de flujo de la PTAR San Miguelito, con sedimentación primaria	57
Figura 29 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	69
Figura 30 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	78

1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más

Descripción general de la PTAR San Miguelito en Cozumel

La PTAR San Miguelito se encuentra al noreste de la localidad de Cozumel y trata las aguas residuales de origen doméstico, comercial y de los hoteles de la cabecera municipal. La operación de la PTAR corresponde al municipio de Cozumel a través de la CAPA, Organismo Operador de Cozumel, el cual es responsable de la operación y mantenimiento de la PTAR.



Figura 1 Vista Aérea PTAR San Miguelito en Cozumel

Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases

La PTAR San Miguelito de Cozumel se construyó en el año 1982 y se rehabilitó en 2012. Con la rehabilitación de la PTAR se aumentó la capacidad nominal de tratamiento hasta 220 L/s, la información de la CAPA indica que el caudal medio tratado en el año 2021 fue de 120 L/s. La PTAR cuenta con una línea de reúso de agua tratada para abastecer al club de golf cercano (Cozumel Country Club), aunque fue descontinuada.

A continuación, se indican las operaciones y procesos que conforman el tren de tratamiento de la PTAR San Miguelito, el valor entre paréntesis indica el número de unidades:

Tren de tratamiento de agua:

- + Pretratamiento automatizado: criba (1), Equipo de pretratamiento compacto Ro5 compuesto por cribado rotatorio, desengrasador y desarenador (1).
- + Filtro rociador (1)
- + Reactor de lodos activados (2), aireación por aire difuso
- + Clarificación secundaria (2)
- + Tanque de contacto de cloro (1)
- + Cisterna y bombeo de agua tratada para reúso (1), fuera de servicio
- + Pozos de infiltración de agua tratada (2)

Tren de tratamiento de lodos:

- + Espesador gravitacional (1), sin operación.
- + Digestión aerobia (1) completamente abandonada
- + Desaguado mecánico (1), fuera de operación
- + Destino del lodo desaguado: en los mismos terrenos de la PTAR.

El agua tratada se dispone en el subsuelo mediante pozos de infiltración.

Descripción general del proceso

El agua residual del sistema de alcantarillado ingresa a la PTAR y se dirige hacia la plataforma de pretratamiento. Esta corriente entra bombeada desde diferentes cárcamos de la localidad, por lo que no existe un cárcamo dentro de la planta para esta corriente. Adicionalmente, la PTAR cuenta con una estación de recepción de agua de pipas, desde la cual se bombea el agua a la plataforma de pretratamiento.

Ambas corrientes de agua residual ingresan a una caja mezcladora y posteriormente hacia la unidad de pretratamiento compacta. Esta unidad conjunta una criba rotatoria automática, así como un tanque de desarenación y remoción de grasas. El equipo se refiere con frecuencia con su modelo, Ro5, y existe en todas las PTAR de la CAPA.

De la unidad de pretratamiento el agua es conducida hacia el filtro rociador. Este se compone de un brazo distribuidor rotatorio y un cárcamo de recirculación y elevación de agua. El brazo tiene la función de repartir el agua residual influente sobre un empaque ordenado, en el que se desarrollan microorganismos y se lleva a cabo la remoción de materia orgánica.

Al momento de la visita, el brazo mecánico se encontraba fuera de operación por lo que el agua no era distribuida uniformemente sobre el medio, junto con las consecuencias sobre el proceso que esto implica. El efluente del filtro rociador se dirige hacia el cárcamo de elevación, el cual eleva el agua hacia el reactor de lodos activados.

El reactor de lodos activados es tipo convencional y mezcla completa y cuenta con aireación de burbuja fina. Está dividido en dos unidades del mismo tamaño, cada una recibiendo la mitad del caudal de agua a tratar. El efluente de esta unidad se dirige hacia el clarificador secundario existente donde se da la separación de los biosólidos del agua.

El agua clarificada pasa al tanque de contacto de cloro para la desinfección. Inicialmente se contaba con cloro gas para este fin, sin embargo, los tanques de almacenamiento de cloro fueron retirados, por lo que en la actualidad se desinfecta con pastillas de cloro. El agua tratada se dirige hacia infiltración en alguno de los dos pozos con que cuenta la PTAR o hacia reúso. La PTAR cuenta con una instalación formal de bombeo de agua de reúso para entregar a diferentes desarrollos recreativos y hoteles cercanos.

En la operación ordinaria, el lodo secundario purgado del clarificador se envía hacia el digestor aerobio de lodos para la estabilización de estos. La PTAR cuenta con un sistema de espesado de lodos y natas con el que se mantiene una concentración de sólidos estable en el digestor. El lodo efluente del digestor de lodos es enviado hacia un filtro banda para su desaguado. Finalmente, el lodo desaguado pasa a una caseta cubierta para secado adicional.

En la actualidad todo el tren de lodos se encuentra fuera de servicio, (el digestor, el espesador de lodos, y el desaguado, la caseta) por lo que los lodos son enviados con baja concentración de sólidos a disposición dentro de terrenos de la PTAR.

Diagrama de flujo de proceso

Para facilitar la comprensión, en la Figura 2 que muestra el diagrama de flujo simplificado del proceso actual de tratamiento de agua y lodos.

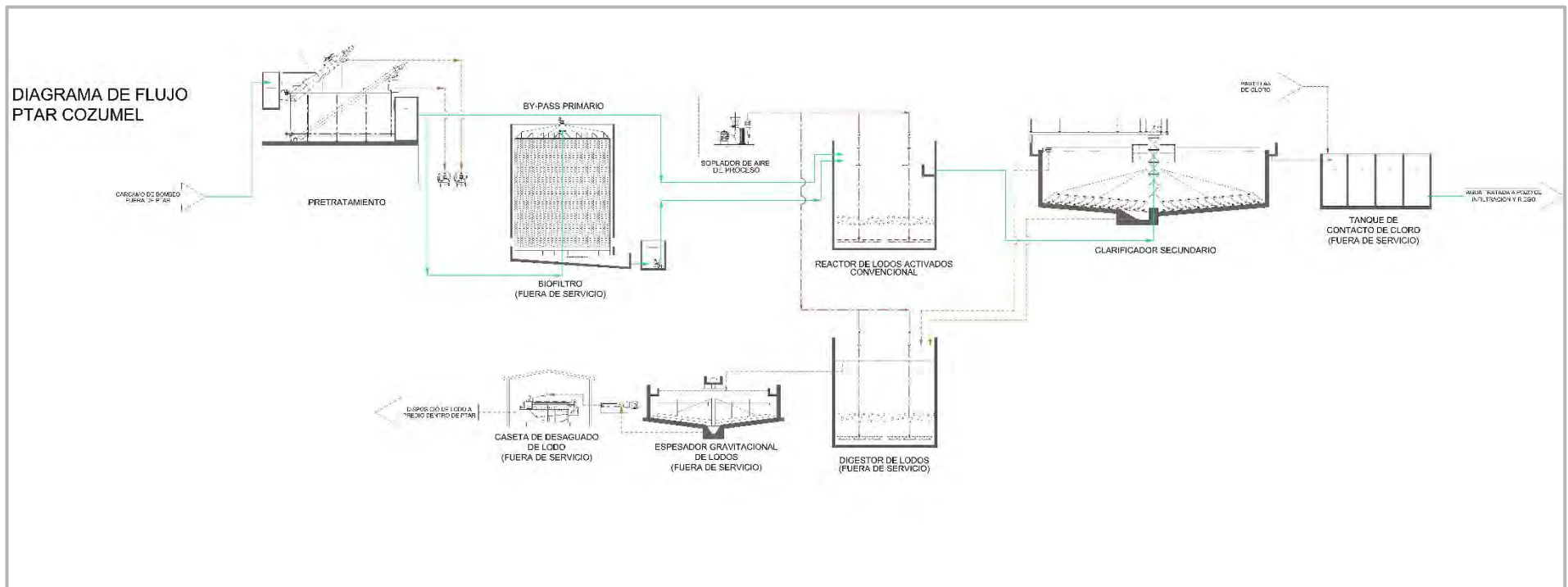


Figura 2 Arreglo general de unidades de la PTAR San Miguelito

Descripción de las unidades de proceso

Como parte del trabajo de campo elaborado en este Estudio, se recopiló información sobre las características, dimensiones y condiciones de operación y mantenimiento de las unidades de proceso de la PTAR. Como se presentará más adelante, la PTAR San Miguelito presenta deterioro medio a severo en diversas zonas de las PTAR, específicamente en el tren de lodos, donde la mayoría de los equipos se encuentran en condición de abandono.

Al igual que otras PTAR de la CAPA, una gran limitación al funcionamiento adecuado de la planta es que solamente cuenta con un operador y un auxiliar por turno para toda la planta. Esto se hace evidente también en las fotografías presentadas, donde gran parte de las instalaciones presentan crecimiento de vegetación, además de la falta de registros de operación.

Tren de Tratamiento de Agua

Estación de recepción de residuos de pipas e ingreso de agua residual

La PTAR cuenta con dos fuentes de agua residual (Figura 3). La primera proviene del alcantarillado e ingresa bombeada directamente a la plataforma de pretratamiento de la PTAR. La segunda ingresa mediante el cárcamo de recepción de agua de pipas, desde donde se bombea el agua a la plataforma de pretratamiento.

El agua residual que ingresa por el alcantarillado cuenta con un medidor de flujo ultrasónico, aunque al momento de la visita se encontraba fuera de servicio (Figura 4). La corriente de agua ingresada por las pipas no cuenta con medidor, y el personal de operación no pudo estimar sobre la cantidad de agua recibida por este medio.

Pretratamiento

El agua residual proveniente del emisor, así como el agua bombeada del cárcamo ingresa al equipo Ro5 en la plataforma de pretratamiento (Figura 5). Este equipo cuenta con un sistema de criba rotatoria, desarenado horizontal y desengrasado (Figura 6), aunque la criba rotatoria y algunos periféricos han empezado a presentar fallas.

El equipo Ro5 se presenta en todas las PTAR de la CAPA, y en todos presenta problemáticas similares. De acuerdo con información del personal de operación, el principal problema y que desencadena el mal funcionamiento de los restantes es la criba rotatoria, cuyos cepillos limpiadores y rejillas se deterioran muy rápido.

De entre los equipos Ro5 observados en las PTAR visitadas, el de la PTAR Cozumel tiene el mejor estado de conservación, aunque, de acuerdo con el personal de operación, ya empezó a presentar los problemas de cribado con los que empezaron los equipos de otras plantas.

Filtro rociador

El agua pretratada ingresa al filtro rociador (Figura 7), el cual está planeado para tratar el 100% del caudal de agua a tratar (220 L/s). Ya dentro del filtro, el agua pasa través de un brazo distribuidor

para caer sobre un empaque ordenado, donde se desarrollan los microorganismos y se lleva a cabo la remoción de DBO.

En la actualidad, el motor que hace girar el brazo no funciona, y presenta obstrucciones, lo que provoca una pobre distribución del agua sobre el medio y su desempeño de remoción de materia orgánica. Además, se observa la presencia de moscas de biofiltro, ocasionadas por un mojado no uniforme del biofiltro. Las dimensiones de esta unidad se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1:
Dimensiones Filtro Rociador

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	1
Diámetro	m	18
Altura de medio	m	3
Altura recta total	m	5
Volumen útil del medio	m ³	763.4

Posterior al filtro rociador se encuentra un cárcamo de elevación desde el que se conduce el efluente hacia el reactor de lodos activados (Figura 8). En este caso, la unidad no cuenta con la capacidad de recircular una parte del caudal hacia sí mismo, lo que representa una importante omisión de diseño. La recirculación ayuda a mantener mojado el medio, lo que evita la formación de moscas y ayuda a mantener un desempeño constante de la unidad.

Reactor de lodos activados tipo mezcla completa en dos tanques paralelos

El reactor de lodos activados recibe el agua del filtro rociador. El reactor está modulado en dos unidades del mismo tamaño, de tipo mezcla completa y con aireación difusa de burbuja fina (Figura 9). Un soplador de aire centrífugo alimenta aire para los dos reactores en operación. Aunque se cuenta con sensores de oxígeno disuelto, estos no funcionan. Las dimensiones del reactor presentan en la Tabla 2.

Tabla 2:
Dimensiones Reactores de Lodos Activados PTAR San Miguelito

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	2
Largo	m	42.0
Ancho	m	13.6
Tirante hidráulico	m	3.72
Volumen total	m ³	4,250

Durante la visita se observó una distribución poco uniforme del aire en la superficie de algunas partes del reactor. Esto sugiere el taponamiento de algunos difusores, aunque no aparenta tener un impacto significativo en la calidad de agua.

Clarificador secundario

El agua efluente del reactor de lodos activados se conduce hacia alguno de los dos clarificadores secundarios existentes (Figura 10). El clarificador separa los sólidos del agua tratada para posteriormente enviarla a desinfección. De esta unidad se realiza la recirculación de lodo hacia los reactores de lodos activados y la purga de lodo.

En el caso de la planta Cozumel, en los vertedores efluentes de los clarificadores secundarios se colocan pastillas de cloro para complementar la desinfección. En general, al momento de la visita se observaba una calidad de agua buena (Figura 11). En la Tabla 3 se presentan las dimensiones de esta unidad.

Tabla 3:
Dimensiones Clarificadores Secundarios PTAR San Miguelito

Concepto	Unidad	Clarificador A
Diámetro	m	28.5
Número de unidades	No.	2.0
Área por unidad	m ²	638

Concepto	Unidad	Clarificador A
Tirante hidráulico, SWD	m	3.5
Volumen total	m ³	4,850

Uno de los clarificadores cuenta con una tubería de alimentación de apoyo (Figura 10), que fue instalada temporalmente debido a una obstrucción ocurrida en la tubería principal.

Desinfección

El agua clarificada pasa al tanque de contacto de cloro (Figura 12). En un principio, la desinfección se realizaba por un sistema dosificación de gas cloro, sin embargo, fue retirado por riesgos de fuga en los tanques de almacenamiento los cuales fueron retirados (Figura 13). En su lugar la desinfección se realiza por hipoclorito de sodio o pastillas de cloro colocadas ocasionalmente en los vertedores del clarificador secundario.

Disposición y aprovechamiento de agua tratada

El agua clarificada es descargada hacia alguno de los dos pozos de infiltración existentes (Figura 14). Ambos se encuentran ocupados por la vegetación, lo que hace difícil su acceso, además que presentan deterioro severo en válvulas y conexiones. El efluente no cuenta con medidores instalados, por lo que se estima por otros medios.

La PTAR cuenta con un tanque interno para el aprovechamiento de agua tratada en diferentes servicios (Figura 15). Desde este se tiene la posibilidad de mandar agua tratada al campo de golf y algunos desarrollos hoteleros. Esta línea cuenta con medición al efluente, aunque la ubicación del transductor de medición se encuentra inundada.

Vistas del tren de tratamiento de agua

De la Figura 3 a la Figura 12 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de agua de la PTAR.



Figura 3 Cárcamo de recepción de pipas e ingreso de agua residual a plataforma de pretratamiento



Figura 4 Carátula de medidor de caudal influente (fuera de servicio) y transductores para medición ultrasónica



Figura 5 Equipo Ro5 en vista lateral y superior



Figura 6 Criba rotatoria y descarga de arenas



Figura 7 Filtro rociador



Figura 8 Estación de bombeo de recirculación y elevación del biofiltro



Figura 9 Reactor de lodos activados

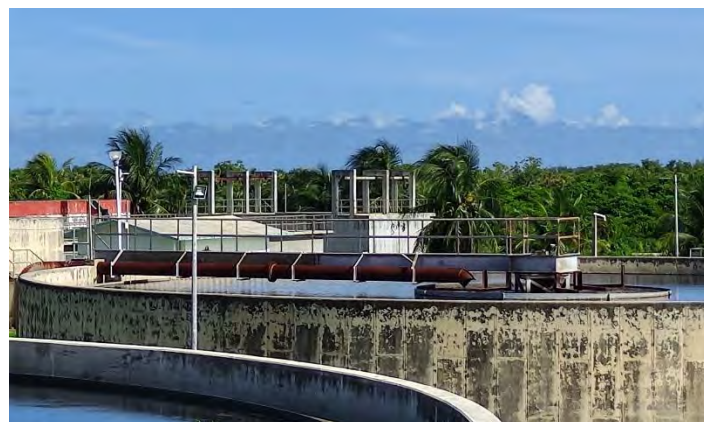


Figura 10 Vista general de clarificador secundario y cámara central

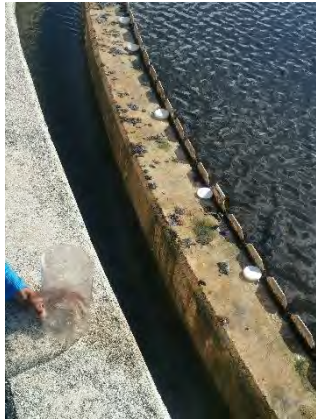


Figura 11 Vertedores de clarificador con pastillas de cloro y apariencia de agua tratada



Figura 12 Tanque de contacto de cloro



Figura 13 Caseta de dosificación de cloro vacía



Figura 14 Pozo de infiltración cubierto de maleza



Figura 15 Cárcamo de agua para reúso y medidor de agua para reúso (inundado)

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua

Con el fin de verificar que las principales estructuras de proceso del tren de tratamiento de agua sean adecuadas en su diseño para tratar el agua y carga de contaminantes en el agua cruda, se efectuó la evaluación de los parámetros relevantes de cada una, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para tal efecto se utilizaron las dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior, además de la calidad influente a la PTAR establecida por CAPA, presentada a continuación:

- + Caudal medio de diseño 220 L/s
- + Calidad de agua cruda establecida por CAPA:
 - DQO, 879 mg/L
 - SST, 441 mg/L

- DBO, 483.5 mg/L

En la Tabla 4 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de agua, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado con las dimensiones de las estructuras, en caso de no contar con algún dato de operación se asignó un valor promedio del rango típico. Los rangos típicos indicados para el reactor y clarificador son para procesos de lodos activados con mezcla completa. Cabe destacar que la siguiente evaluación considera el funcionamiento adecuado de las unidades, para comprobar su diseño y mejor escenario. Actualmente la PTAR opera alejado de estos valores.

Tabla 4:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor
Filtro rociador			
Caudal medio que ingresa al FB	L/s	No aplica	220
Carga orgánica volumétrica	kg/m ³ -d	1.6 a 4	12.04
Porcentaje de remoción de DBO en FB esperado	%	40 a 70%	10%
Reactor de lodos activados			
Concentración de DBO influente al reactor	mg/L	No aplica	435.1
Carga orgánica influente a reactor de lodos activados	kg/d	-	8,270
Concentración de SSTLM	mg/L	3,000 - 4,000	3,500
Fracción volátil		0.7-0.8	0.75
Relación F/M	kg/kg - d	0.2 a 0.6	0.65
Carga volumétrica	kgDBO/m ³ - d	0.3 a 1.6	1.71
Tiempo hidráulico de retención total	horas	5 a 15	6.1
Tirante hidráulico	m	4.5 a 7.5	3.7

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor
Clarificador Secundario			
Carga hidráulica superficial, Caudal medio	m ³ /m ² -d	16 a 28	14.9
Recirculación	%	25 a 100%	100%
Carga de sólidos, Caudal medio	Kg/m ² - h	4 a 6	4.35
Tirante hidráulico	m	4 a 5	4
Tanque de contacto de cloro			
Tiempo hidráulico de retención	min	30	69.3

Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + A la condición de diseño, el filtro rociador excede la carga orgánica recomendada por la literatura especializada, con 12 kg/m³-d contra 4 kg/m³-d máximos recomendados. Esto provoca una disminución considerable de la eficiencia de remoción de materia orgánica.
 - Para la evaluación de proceso, se asumió una eficiencia de remoción del 10%, mucho menor que la esperada de 40% mínimo.
- + A la condición de diseño, el reactor de lodos activados opera con valores de carga orgánica volumétrica y F/M (1.71 kg DBO/m³-d y 0.65 kg DBO/kg SSV d respectivamente) mayores a los valores máximos recomendados (hasta 1.6 kg DBO/m³-d y 0.6 kg DBO/kg SSV d).
 - La sobrecarga en el reactor de lodos activados puede traer problemas de operación y dificulta alcanzar los objetivos de calidad de agua tratada.
 - La sobrecarga se debe parcialmente al pobre desempeño del filtro rociador. Aun si funcionará adecuadamente (con el brazo distribuidor funcional), al encontrarse sobrecargado, toda la materia orgánica que no remueva esta unidad termina por ingresar al reactor de lodos activados.
- + El bajo tirante hidráulico del reactor, de 3.7 m, representa un obstáculo para la transferencia de aire en la difusión de burbuja fina, en general a mayor profundidad mayor eficiencia de transferencia de oxígeno.
- + Para el correcto funcionamiento de la PTAR a las condiciones de diseño se requiere aumentar la capacidad del tratamiento primario.
- + El clarificador secundario opera cercano a los rangos inferiores de carga hidráulica recomendados, por lo que cuenta con suficiente capacidad para tratar el caudal de agua de

diseño, e incluso con capacidad de sobra.

- + El tanque de contacto de cloro cuenta con capacidad suficiente para proporcionar el tiempo de residencia necesario para la desinfección del agua tratada. Sin embargo, para su uso debe ser reestablecido el sistema de dosificación de cloro gas, o hipoclorito de sodio en su defecto.

Tren de Tratamiento de Lodos

En general todo el tren de lodos se encuentra abandonado y en estado de deterioro medio a severo. La vegetación ha tomado parte de las unidades, lo que hace evidente la falta de mantenimiento en la PTAR.

Digestor aerobio de lodo, espesado y desaguado de lodo

El tren de lodos comienza desde el cárcamo de recirculación y bombeo de natas (Figura 14) desde donde se purga el exceso de lodo secundario al digestor aerobio. Posteriormente, el diseño del proceso es similar al de otras PTAR de la CAPA. El lodo es estabilizado de manera aerobia y concentrado mediante un espesador gravitacional posterior a esta unidad, antes de ser mandado a desaguado por un filtro banda.

Sin embargo, en la PTAR Cozumel todo el tren de lodos se encuentra abandonado y es evidente que no ha recibido mantenimiento en mucho tiempo. De acuerdo con el personal de operación, algunos equipos no han sido utilizados desde que se instalaron en la rehabilitación y ampliación de la PTAR en 2018. Debido a esto, los lodos secundarios no estabilizados son dispuestos a baja concentración de sólidos en los terrenos de la PTAR. Sobre las unidades se observa:

- + El digestor aerobio de lodos se encuentra vacío y cubierto de maleza, creciendo en el suelo, las tuberías y los difusores de aire (Figura 17). Sus dimensiones se presentan en la Tabla 3.
- + La caseta de desaguado de lodo alberga dos filtros banda, de antes y después de la rehabilitación y ampliación de la PTAR. El filtro banda nuevo, no ha sido utilizado desde su instalación. La tolva de descarga de lodo presenta deterioro severo y se encuentra cubierta de maleza (Figura 18).
- + La PTAR cuenta con una caseta para secado de lodos y un cárcamo para recirculado del agua recuperada (Figura 19). Esta se encuentra con parte cubiertas de maleza.

El abandono de los equipos y del mantenimiento es una consecuencia importante de la falta de personal de operación para la planta.

Tabla 5:
Dimensiones Digestor Aerobio de Lodo PTAR San Miguelito

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	1.0
Largo	m	24
Ancho	m	24
Tirante hidráulico	m	3.5
Volumen total	m ³	2,016

Vistas del tren de tratamiento de lodo

De la Figura 13 a la Figura 17 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de lodo de la PTAR.



Figura 16 Cárcamo de recirculación de lodo y cárcamo de natas



Figura 17 Digestor aerobio de lodos abandonado



Figura 18 Aspecto de la planta alta de la caseta de desaguado de lodos con equipos fuera de operación.



Figura 19 Estructura para secado final de lodos y cárcamo de retorno

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de lodo

Con el fin de verificar que las principales estructuras y equipos de proceso del tren de tratamiento de lodo sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño más relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para esta evaluación se consideraron las siguientes premisas de cálculo:

- + Dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior
- + Producción de lodos, se estimó con base en la fórmula simplificada de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) con los datos de caudal medio de diseño y calidad de agua cruda promedio del histórico (SST y DBO), mismos que se utilizaron para la evaluación del tren de agua (US EPA, 1993).
- + Para determinar el volumen de lodos se utilizaron las concentraciones típicas esperadas en la purga de lodo secundario.
- + De manera conservadora, se consideró que los equipos mecánicos de desaguado operan con un rango común de operación, 16 horas al día, 7 días a la semana.

En la Tabla 6 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de lodo, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR con las dimensiones de las estructuras y capacidades de equipos. En caso de no contar con algún dato de operación se consideró un valor promedio del rango típico.

Tabla 6:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR
Producción de lodo			
Producción de lodo esperada	kg SST /día	No aplica	7,907
Concentración		0.5 a 1.5%	0.70%
Flujo volumétrico	m3/día	No aplica	1,130
Digestión Aerobia de lodo			
Concentración de lodo en tanque (por espesado de lodo)	%		2%

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR
Volumen de lodo alimentado equivalente	m ³ /día		393.4
Tiempo de retención hidráulico (edad de lodo)	días	18 a 20	5.1
Carga de sólidos volátiles	kgSSV/m ³ -d	1.6 a 4.8	2.9
Destrucción esperada		38 a 50%	20%
Masa de lodo digerido estimada	kg SST /día		6,721
Desaguado de Lodo			
Días de operación por semana			7
Horas de operación por día			16
Ancho de banda	m	1 a 3	1.5
Carga de sólidos (por metro)	kg/h	250 a 410	280
Carga hidráulica (por metro)	L/min	150 a 340	273.2
Porcentaje de captura		90 a 98%	95%
Concentración de lodo desaguado		12 a 22%	18.0%
Volumen de lodo desaguado	m ³ /día		35.5
Masa de lodo desaguado estimada	kg SST/día		6,385

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + El desempeño de la digestión depende fuertemente del desempeño del espesado de lodos. El esquema de operación de las PTAR de la CAPA, con el espesado posterior a la digestión, es poco común, y requiere de un esfuerzo operativo mayor para operarlo adecuadamente. Además de ser poco conveniente pues, con un espesador gravitacional, la literatura específica una concentración de sólidos alcanzable entre 2 y 3%, relativamente baja en comparación a otras tecnologías de espesado.

- + A la condición de evaluada, el digestor aerobio de lodos no cuenta con volumen suficiente para mantener la edad de lodos recomendada de entre 18 y 20 días. Esta edad de lodos no podría ser alcanzada aún si mejora el desempeño del espesado de lodos, por lo que es necesario un volumen adicional de digestión para cumplir con la condición de diseño.
- + A la condición evaluada, con 16 horas de operación al día, los 7 días de la semana, el filtro banda opera con cargas hidráulicas y de sólidos adecuadas para su tamaño. Por lo que se concluye que la unidad es adecuada para su objetivo.
- + Debido a la falta de operación del tren de lodos no se pudieron identificar problemáticas de más allá de la evidente falta de mantenimiento y abandono de las unidades de proceso.

Estado de conservación y operación de las instalaciones

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de agua de la PTAR San Miguelito de Cozumel, evaluadas con base en el cumplimiento de la NOM-001-2021 para suelo cárstico en DQO, SST, NT y PT con el promedio histórico de calidad de agua, se clasifican como **“Regular a Buena”**. En la sección **Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada**, se presenta la evaluación de dicha información.

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de lodos, determinadas con base en las condiciones operativas y de desempeño de las operaciones de espesado, digestión y desaguado observadas en la visita, se clasifican como **“Muy mala”**.

En términos generales las condiciones de mantenimiento de los trenes de tratamiento de agua y de lodos se consideran **“Malas”**.

En los párrafos subsecuentes se describe lo observado en la visita técnica efectuada a la PTAR.

La PTAR San Miguelito es una instalación de tratamiento con 40 años en operación, a partir del año 1982, fue rehabilitada en 2012 y otra rehabilitación parcial en 2018. La capacidad de la ptar actual es de 220 L/s. Según reporte de CAPA en 2021 se trató en promedio un caudal de 110 L/s. El diseño de sus operaciones y procesos, así como las dimensiones y características físicas de las unidades responden a criterios, prácticas y objetivos de tratamiento obsoletos o que ya no son aplicables, destacando los siguientes aspectos:

- + Filtro rociador muy pequeño para el caudal de diseño de 220 L/s.
- + Digestor de aerobio de lodos con poca capacidad para estabilización de lodos.
- + Espesado de lodos posterior al digestor aerobio de lodos poco común y conveniente.
- + Desinfección poco eficiente con pastillas de hipoclorito de calcio en los vertedores de los clarificadores secundarios. Esto debido al desmantelamiento del equipo de dosificación de cloro.

Adicional a lo anterior, en la visita de campo se observaron los problemas e insuficiencias que a continuación se indican:

- + Se presentan muchas áreas de la PTAR con deterioro medio o severo. Las problemáticas de proceso, mantenimiento y de operación se acumulan entre sí, de manera que se vuelve complejo arreglar un solo aspecto por vez. En la PTAR Cozumel se observa la invasión de la vegetación en las unidades, lo que acelera su deterioro.
- + No existe medición de influente ni de efluente, estos valores son estimados por el personal operativo mediante horas de operación de equipos y otros métodos empíricos.
- + No se comunicó sobre la cantidad de pipas de agua residual ingresadas a la PTAR por falta de información.
- + No se cuenta con un historial de calidad de agua histórico ni mediciones de caudal formales por un largo tiempo.

- + La PTAR cuenta con poca fuerza de trabajo, se opera con un operador base y un auxiliar, lo que es insuficiente para una planta con estas características. Esto impacta en la falta de mantenimiento y uso de diferentes instalaciones dentro de la planta.
- + No hay una planta de energía de emergencia.
- + El área de laboratorio no es utilizada y almacena actualmente archivo muerto. Consecuentemente, no se tienen registros de parámetros operativos relevantes para el seguimiento de proceso.
- + 4 de los 5 sopladores que alimentan a los reactores de lodos activados se encuentran fuera de servicio pues no cuentan con arrancadores.
- + El pretratamiento automatizado empieza a presentar los mismos problemas de operación, que los otros equipos Ro5 de las PTAR de la CAPA. Sin el mantenimiento adecuado dejará de funcionar a corto plazo.
- + El brazo de distribución de agua en el filtro rociador se encuentra obstruido y fuera de servicio, lo que le quita la funcionalidad a esta unidad. Aun así, como se observó en la revisión de proceso, esta unidad es demasiado pequeña para su objetivo.
- + El reactor de lodos activados y la clarificación secundaria operan adecuadamente y producen un efluente clarificado de buena calidad.
- + El equipo de desinfección mediante cloro gas fuera de operación y actualmente están poniendo pastillas de hipoclorito de calcio en los vertedores de los clarificadores como complemento. Este modo de operación garantiza la desinfección para una planta de este tamaño.
- + Cisterna y bombeo de agua tratada para reúso no opera pues cesó la demanda de agua tratada del campo de golf y desarrollos cercanos.
- + Las instalaciones hidráulicas y civiles de los pozos de infiltración de agua se observan con severo deterioro y carentes de protección y de adecuado mantenimiento; además carecen de medición de caudal en cada pozo.

Con respecto al equipamiento mecánico existente se observa lo que a continuación se describe:

- + El equipo desarenador automático se encuentra en un estado regular, y presenta problemas en la criba automática rotatoria, lo mismo que la bomba de purga
- + El biofiltro con el brazo sin movimiento y algunas salidas obstruidas, lo cual resulta en que el agua se distribuye en una pequeña porción de la superficie.
- + El tanque de lodos activados se observa en condiciones aceptables, se abastece de 5 sopladores: 3 de 100 hp y 2 de 150 hp. Durante la visita solamente uno de 100 hp se encontraba en funcionamiento debido a la falta de arrancadores para las otras unidades.
- + El manejo de los lodos es deficiente porque no está operando ni el espesador, la digestión aerobia, ni el desaguado de lodos. Dispone además de un área techada para secado final de los lodos, que está en desuso. Todo esto da como resultado que el lodo se disponga en el terreno de la PTAR.
- + En la planta se observan estructuras que fueron parte de la etapa inicial de la planta, las

cuales están en algunas partes demolidas y en otras invadidas por maleza.

- + Cuenta con un solo medidor de energía eléctrica de la CFE , el cual alimenta al CCM1 que contenía a la mayor parte de los equipos de la PTAR. Por problemas en las canalizaciones eléctricas muchos equipos experimentaron cortos o son propensos a eso. Por esta razón varios equipos cuentan con alimentación eléctrica con cables sobre la superficie del suelo y algunas conexiones están también expuestas.
- + La PTAR contaba con un SCADA inicialmente, pero dejó de funcionar debido a un corto eléctrico.

La operación de la PTAR la realizan dos personas por turno, un jefe de planta y un operador. No se cuenta con personal específico para realizar mantenimiento de la ptar, lo cual repercute en el estado general de la planta. Tiene medidor de influente y efluente de tipo ultrasónico, pero solamente funciona el medidor del efluente para el agua enviada a reúso.

En el Anexo 1 (Ficha de la PTAR) se presenta la descripción detallada de las características y condiciones actuales de operación y mantenimiento de las estructuras y equipos del tren de agua y lodos.

Análisis de calidad del agua cruda

Calidad de agua cruda, histórica

A continuación, se presentan los datos de calidad de agua cruda proporcionados en la Base de Datos de la CAPA para la PTAR San Miguelito. No se proporcionaron datos de varios muestreos, únicamente los valores presentados en la siguiente tabla.

Tabla 7:
Calidad de agua residual cruda (mg/L)

SST	DBO	DQO	Nitrógeno Total	Fósforo Total
441	--	879	60	12.7

Calidad de agua cruda, de este Estudio

Del 29 al 30 de septiembre se efectuó un muestreo compuesto de 24 horas tanto en el influente y efluente de la PTAR San Miguelito, este se efectuó con seis muestras simples, a cada una de estas se les realizaron los siguientes análisis de campo:

- + pH
- + Temperatura del agua
- + Cloro residual libre (efluente)
- + Los parámetros analizados en el laboratorio fueron los siguientes:
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)
- + Escherichia coli (efluente)
- + Toxicidad Vibrio fischeri (efluente)
- + Huevos de helminto
- + Color verdadero (UV-Vis) a 436, 525 y 620 nm

Las actividades de colecta, preservación y análisis de las muestras fueron realizadas por personal de Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis (Intertek + ABC Analitic), éste cuenta con la acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA) en la rama de agua número AG-096-029/11 para su laboratorio ubicado en la ciudad de México y AG-096-029/11_S1 para el laboratorio de Mérida, que es donde se realizarán los análisis.

En todos los casos, la preservación y el almacenamiento de las muestras se efectuaron de acuerdo con los lineamientos que establece la normatividad mexicana. Las muestras colectadas fueron preservadas con hielo a una temperatura de 4°C con la intención de que no se degradaran, y fueron transportadas en una hielera al laboratorio correspondiente para su análisis.

El transporte se hizo con sumo cuidado, de tal forma que se evitaron los derrames y/o contaminación de muestras debido a rupturas de frascos o cualquier otro accidente.

Los diferentes frascos que integran las muestras se preservaron con los reactivos señalados en la normatividad. En el Anexo 3 se presentan los resultados completos del laboratorio del influente y efluente de la PTAR San Miguelito. En la Figura 20 se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR San Miguelito.

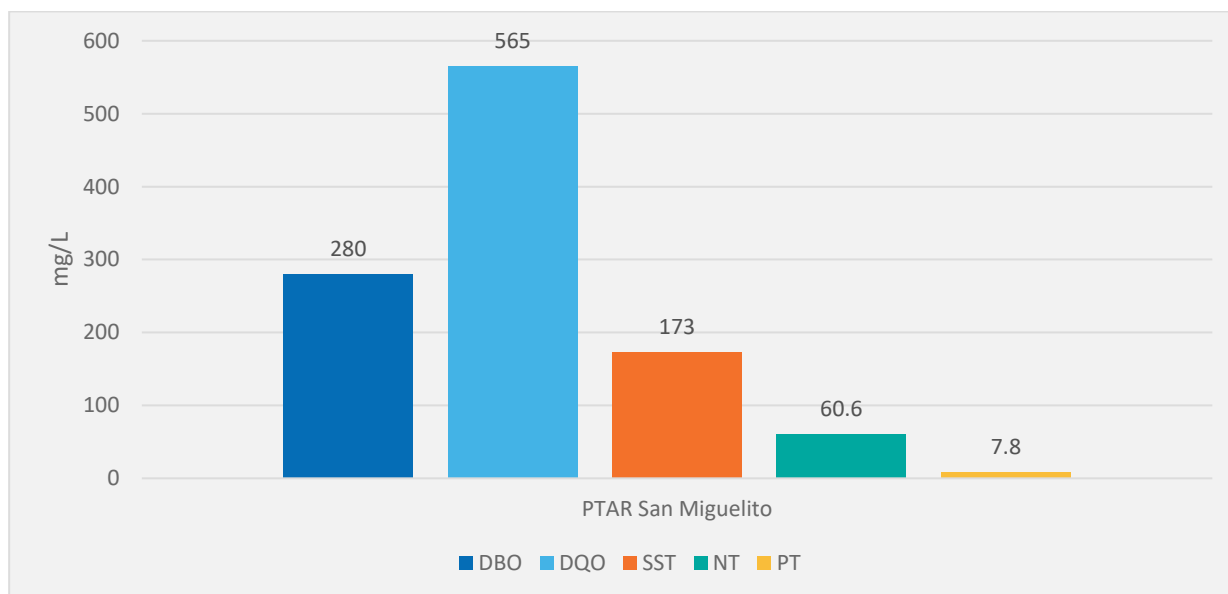


Figura 20 Caracterización del agua cruda (sep-2022)

Con la finalidad de conocer la relación de contaminantes, se realizaron los cálculos que a continuación se presentan en la siguiente tabla, los cuales fueron determinados con los valores obtenidos en este Estudio.

Tabla 8:
Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente

Relación	Valor Estudio 2022	Rango típico en Aguas Residuales Municipales ¹
DBO5/ DQO	0.50	0.45 – 0.55
SST/ DBO	0.62	0.80 – 1.20
NTK/ DBO	0.22	0.10 – 0.20
Fósforo/ DBO	0.03	0.02

¹ (US EPA, 1993)

Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada

En las siguientes figuras y tablas se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada del histórico de datos proporcionados por CAPA y de los obtenidos en el presente Estudio, en estas se presentan los límites permisibles (LP) establecidos en la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelo cárstico.

Calidad de agua tratada, histórica

Se proporcionaron datos de 165 muestreos de tipo compuesto efectuados en el efluente durante el periodo del año 2020 al 2021.

Los parámetros incluidos en las bases de datos de CAPA son los siguientes:

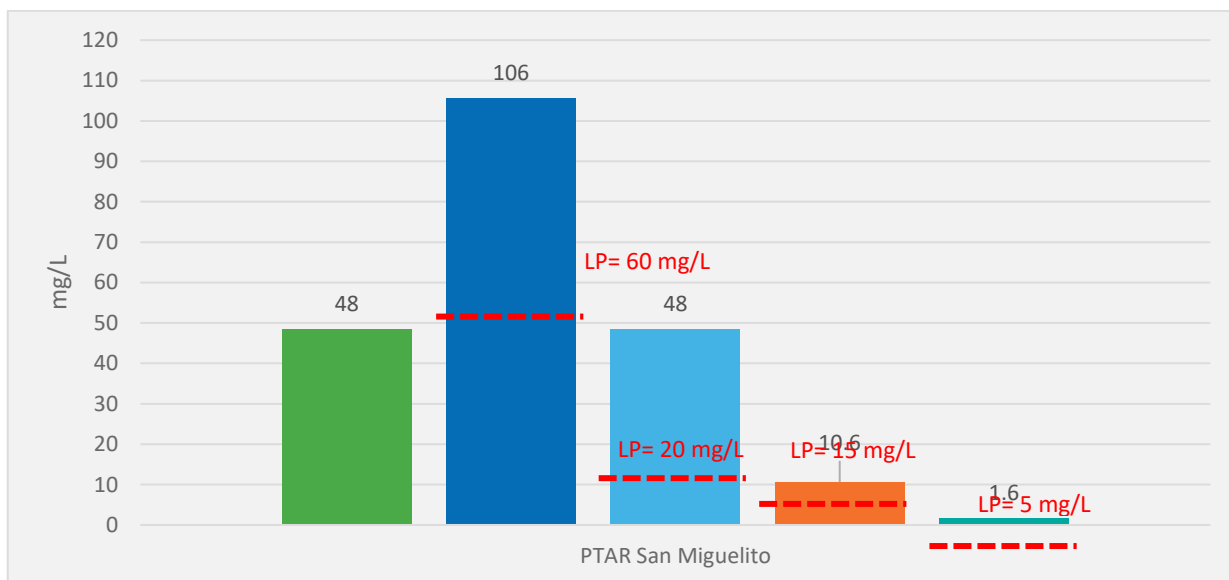
- + Caudal promedio
- + Temperatura
- + pH: Potencial de hidrógeno
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos sedimentables
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Nitrógeno amoniacal (N-NH₃)
- + Fósforo total (PT)
- + Coliformes fecales
- + Arsénico
- + Cadmio
- + Cianuro
- + Cobre
- + Cromo
- + Mercurio
- + Níquel
- + Plomo
- + Zinc

En la siguiente tabla se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros en el agua tratada de la PTAR San Miguelito.

Tabla 9:
Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)

Concepto	G & A mg/L	SST mg/L	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	NT mg/L	NTK mg/L	PT mg/L	Huevos de helminto (huevos/L)	Coliformes fecales (NMP/100 mL)
No. De datos	158	165	163	159	127	163	162	145	145
Mínimo	5	10	18	25	5.56	4.80	0.20	0.2	3
1° cuartil	5	27	27	69	5.90	5.60	0.50	0.2	3
Promedio	6	48	48	106	10.58	10.95	1.61	0.2	3
Mediana	5	53	50	108	10.15	11.00	1.30	0.2	3
3° cuartil	5	66	66	139	13.02	13.38	2.20	0.2	3
Máximo	13	87	159	174	17.12	22.00	8.00	0.2	3

A manera de resumen en la Figura 21 se presentan los valores promedio de los principales parámetros del agua tratada de la PTAR San Miguelito, en esta se indican los límites permisibles (LP) para el promedio mensual en la NOM-001.

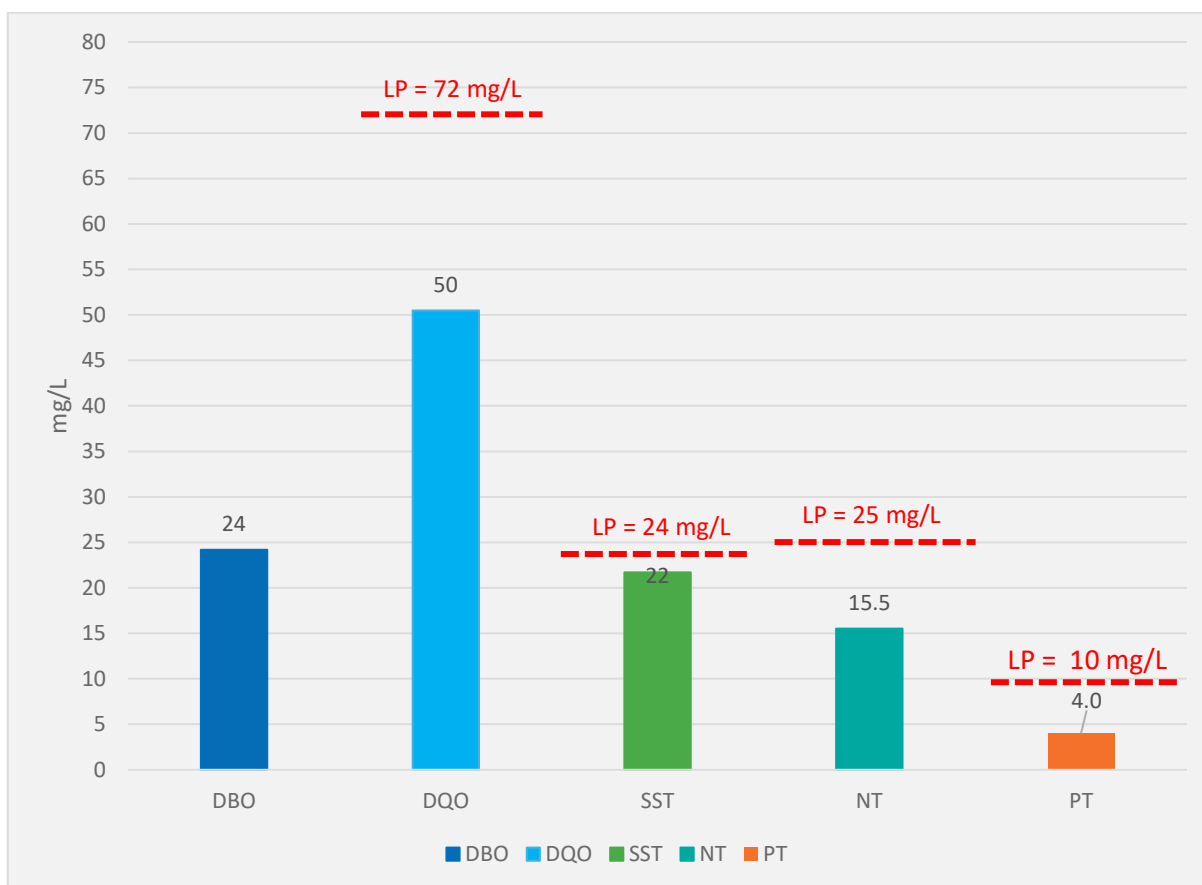


LP = Límite permisible

Figura 21 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)

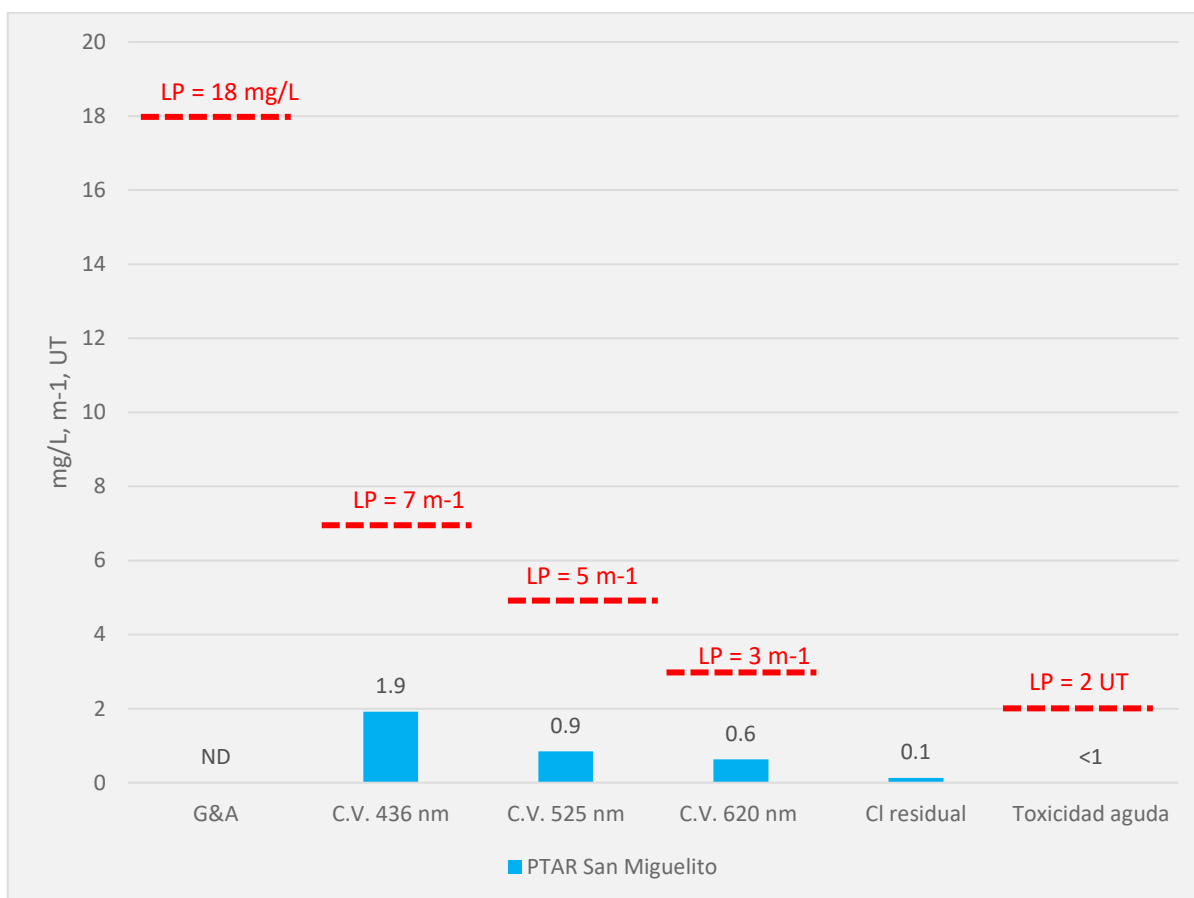
Calidad de agua tratada, de este Estudio

En la siguientes figuras y tabla se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada de la PTAR San Miguelito, en estas se indican los límites permisibles para el promedio diario en la NOM-001-2021.



LP = Límite permisible

Figura 22 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 23 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)

Tabla 10:
Caracterización del agua tratada de este Estudio (*E.coli* y Huevos de helminto)

		PTAR San Miguelito	Límite permisible NOM-001-2021
E.coli	NMP/100 mL	3,162	100
Huevos de helminto	HH/L	<0.2	1

Con la información histórica de calidad de agua tratada proporcionada por CAPA y los

resultados de los análisis efectuados se efectuó el análisis del cumplimiento de los principales parámetros de calidad del agua con respecto a la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021, para los valores de los datos históricos se utilizó el límite permisible del valor promedio mensual y para los resultados de los muestreos efectuados en este Estudio se utilizó el límite permisible del valor promedio diario.

Tabla 11:
Cumplimiento del agua tratada

Parámetro	Valor promedio histórico (2020-2021) (mg/L)	Valor Estudio 2022 (mg/L)	Límite permisible NOM-001-2021	Cumple
SST	48	22	PM = 20 (mg/L) PD = 24 (mg/L)	NO SI
DQO	106	50	PM = 60 (mg/L) PD = 72 (mg/L)	NO SI
Nitrógeno total	10.6	15.5	PM = 15 (mg/L) PD = 25 (mg/L)	SI
Fósforo total	1.6	4.0	PM = 5 (mg/L) PD = 10 (mg/L)	SI

PM = promedio mensual, PD = promedio diario

Con respecto al color verdadero en las tres longitudes de onda y la toxicidad aguda se obtuvieron valores dentro del límite permisible, la concentración de *E. Coli* estuvo por encima del límite permisible.

Parámetros de operación del reactor de lodos activados

Como parte de los trabajos de caracterización del agua cruda y tratada de la PTAR, también se incluyó la medición de los parámetros de operación del reactor de lodos activados, oxígeno disuelto (OD) y sólidos sedimentables (SS). Los datos obtenidos en campo se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12:

Oxígeno disuelto y Sólidos Sedimentables en reactor de lodos activados de la PTAR

Equipo	Valor Reactor 1	Valor Reactor 2
Oxígeno disuelto (mg/L)	0.37	3.01
Sólidos Sedimentables (mL/L)	850	740

El oxígeno disuelto en los reactores confirma la ariación irregular observada durante la visita de campo. Es posible que se encuentren algunos difusores obstruidos, lo que provoca esta diferencia de valores.

En cuanto a los SS se realizó la prueba con dos buretas un tiempo de 30 minutos (Figura 24), resultando 850 mL/L en el Reactor 1 y 740 mL/L en el Reactor 2, que con un índice volumétrico típico de 120 mL/g equivalen a una concentración de SSLM de 7.08 y 6.17 g/L, valores muy altos para este tipo de reactores, en donde la concetración típica esta entre 3.0 y 4.0 g/L (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014).



Figura 24 Prueba de sedimentabilidad PTAR San Miguelito

Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua

Como parte de las actividades realizadas en campo, se registraron las coordenadas de los pozos de infiltración de cada PTAR, utilizando un equipo GPS map 60Cx marca Garmin. En la Tabla 13 se presentan las coordenadas de localización de los pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR San Miguelito. Posteriormente, en la Figura 25 se presentan fotografías correspondientes al levantamiento de las coordenadas con GPS y de los registros o brocales de los pozos de infiltración.

Tabla 13:
Coordenada de pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR

No. de pozo	Coordenadas Latitud	Coordenadas Longitud
1	20.53750	86.89435
2	No accesible	No accesible



Figura 25 Pozos de infiltración PTAR San Miguelito

Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR

Pendiente de incorporar, no se ha recibido la información por parte de CAPA.

Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) de cada planta

De acuerdo a la información proporcionada por la CAPA, el costo total de O & M de la PTAR San Miguelito en el año 2021 fue de 6.55 millones de pesos (mdp's), desagregado de la siguiente forma:

- + Costo de operación: 3.93 mdp's
- + Costo de mantenimiento: 2.62 mdp's

Considerando que el caudal medio de agua tratada en el año 2021 fue de 120 L/s, que representan un volumen anual de 3,784,320 m³, el costo unitario de O & M es de 1.73 \$/m³ de agua tratada.

En relación a la energía eléctrica consumida en el proceso de tratamiento, la información proporcionada indica los siguientes valores anuales:

- + Consumo anual de energía: 475,644 kWh
- + Costo anual: \$ 1,577,963

A partir de los valores previos se calcularon los siguientes indicadores:

- + Costo unitario de la energía. 3.32 \$/kWh
- + Consumo unitario de energía: 0.13 kWh/m³
- + Costo energía respecto al costo O & M: 24 %

En la información del costo de O & M, así como la de consumo y costo de energía eléctrica se debe tener en consideración lo siguiente respecto a la PTAR San Miguelito:

- + El digestor de lodos está abandonado, por lo que no tiene este consumo muy significativo de energía.
- + Las etapas de espesado y desaguado de lodo no operan, por lo que, además de la

energía eléctrica no consumida, tampoco se tiene el costo por consumo de polímero.

- + El lodo sin estabilizar se dispone de manera líquida en el terreno, eliminando el costo de acarreo y disposición de lodo desaguado.
- + La planta carece del personal suficiente y requerido para una adecuada operación y mantenimiento.

Estimación de los costos de operación y mantenimiento

A efecto de comparar el costo de operación reportado por la CAPA contra un costo de referencia se procedió a estimar los costos anuales de un grupo de insumos relevantes:

- + Energía eléctrica,
- + Cloro para desinfección,
- + Polímero para espesado y/o desaguado de lodo,
- + Acarreo de lodo desaguado, y
- + Análisis de laboratorio de agua tratada y lodo para cumplimiento normativo y control de proceso
- + Personal de O & M

Para lo anterior, con base en un caudal medio de 120 L/s y la información de caudal y calidad de agua cruda y tratada proporcionada por el Organismo Operador se efectuó un balance de materia simplificado para establecer la masa de DBO removida, la generación de lodos en el tratamiento del agua, la remoción de sólidos suspendidos volátiles en el proceso de digestión y la masa de lodo desaguado a disposición.

Una vez definidos en el balance de materia los valores requeridos, a partir del caudal y calidad del agua cruda influente a la planta, se procedió a aplicar los factores de dosificación o consumo de los principales insumos (energía eléctrica, cloro polímero para espesado y/o polímero para desaguado) con base en las prácticas adecuadas de operación y, en el caso de los análisis de laboratorio de agua tratada y lodos, a partir de los requerimientos normativos.

En la Tabla 14 se presentan las consideraciones aplicadas para establecer el consumo de los insumos arriba indicados, así como el costo unitario asignado:

Tabla 14:
Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Energía eléctrica	Caudal medio de agua tratada y concentración promedio de DBO	1.76 kWh/kgDBO	2.50 \$/kWh
Cloro	Caudal medio de agua tratada	5.0 mg/L	20 \$/kg
Polímero para espesado	Producción de lodo con base en caudal medio y concentración promedio de DBO y SST	Espesador gravitacional existente, sin dosificación de polímero	No aplica
Polímero para desaguado	Fracción volátil del 75 % del lodo producido y remoción del 40 % de SSV en digestor	7.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Acarreo lodo desaguado, base húmeda	Lodo desaguado al 20 % de sólidos Masa de lodo en base seca/0.20	Ton de lodo en base húmeda	150 \$/ton
Análisis laboratorio Agua tratada	NOM-001 población > 50 mil habitantes	2 muestreos/mes	8,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Lodo / biosólidos	NOM-004 hasta 1,500 ton/año (base seca)	1 muestreos/año	10,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Control de proceso	---	1 lote por mes	6,000 \$/mes

El costo del mantenimiento preventivo de la PTAR y los consumibles asociados a esa actividad se estimó aplicando el criterio de destinar un importe anual equivalente al 0.85 % del costo de inversión de la planta con sus actuales características. El costo de la planta se estableció a partir de un costo base de 750 mil pesos por litro – segundo de capacidad media instalada.

Para establecer el costo del personal de operación y mantenimiento se considera una plantilla “tipo” de doce personas, misma que se desagrega en las siguientes plazas: 1 Jefe de planta, 2 Supervisores de operación/mantenimiento, 5 operadores y 4 auxiliares de operación o mantenimiento.

Los sueldos considerados para establecer este rubro de costo están en el rango de 28,000 pesos mensuales para el Jefe de planta y de 12,000 pesos por mes para el auxiliar de operación, los sueldos del resto del personal están comprendidos dentro de este rango.

Los sueldos nominales se afectaron por un factor de 1.50 para incorporar el costo de las diversas prestaciones y seguridad social del personal. De esta forma se determinó un costo total mensual de \$ 306, 000 por concepto de personal.

El factor unitario de consumo de energía eléctrica asignado permite establecer, además de la energía consumida por la planta, otros indicadores que en la PTAR San Miguelito tienen el siguiente valor:

- + Consumo unitario de energía: 0.68 kWh/m³
- + Potencia media de operación: 729 kilowatts

En la Tabla 15 se presentan los consumos e importes anuales de los rubros de costo establecidos, así como el costo unitario de cada rubro, al dividir su importe anual entre el volumen de agua tratada. Posteriormente, en la Figura se presenta de manera grafica el costo unitario desagregado por insumo.

Tabla 15:
Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M

Insumo	Consumo anual	Importe anual, \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Energía eléctrica	2,554,598	6,386,494	1.69
Cloro	18,922	378,432	0.10
Polímero para espesado	---	---	0.00
Polímero para desaguado	8,864	1,329,625	0.35
Acarreo lodo desaguado	5,540	831,015	0.22
Análisis laboratorio		274,000	0.07
Mantenimiento		1,402,500	0.37
Personal de O & M		3,672,000	0.97

Insumo	Consumo anual	Importe anual, \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Total		14,274,066	3.77

Energía eléctrica consumo anual expresado en KWH; cloro, polímero para espesado y polímero para desaguado, en kg; acarreo de lodo, en toneladas.

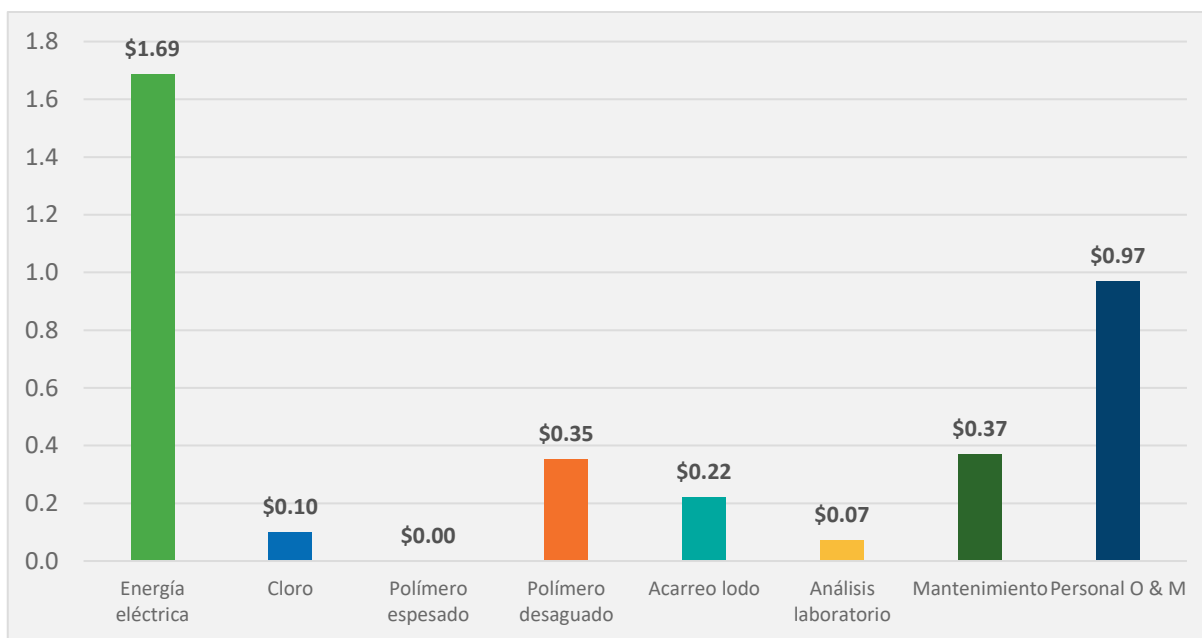


Figura 26 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m³

El importe anual de operación y mantenimiento estimado en esta sección es de 14.27 millones de pesos, con un costo unitario de O & M de 3.77 \$/m³ de agua tratada.

Al comparar el importe anual de O & M estimado con el reportado por la CAPA, de 6.55 millones de pesos, se tiene una excedencia de 7.72 mdp's en el costo estimado con respecto al reportado, que representa una diferencia de $\approx -54\%$.

La amplia diferencia entre el costo estimado y el reportado por la CAPA, no obstante la imprecisión propia del método aplicado, es indicativa de la fuerte insuficiencia de recursos humanos, materiales y económicos con que opera la PTAR San Miguelito.

Esta situación tan adversa se confirma con lo observado en la visita de campo respecto a las condiciones actuales de operación del tren de agua y lodos, así como en los resultados de calidad de agua tratada.

Observaciones y recomendaciones generales

A continuación, se presentan las observaciones y recomendaciones que se desprenden de la evaluación de la información proporcionada por el operador y del diagnóstico en campo y gabinete:

1. Aunque se produce un efluente de agua tratada de calidad de regular a buena, esto se debe en gran parte a que se trata cerca de la mitad de la capacidad de diseño de la planta (110 L/s). Al caudal de diseño (220 L/s) se presentan limitaciones de capacidad en diferentes zonas de proceso.
2. Es necesario reforzar los recursos operativos y de mantenimiento de la planta, pues es evidente la carencia de estos aspectos en la PTAR. Cualquier inversión realizada sin su respectivo cuidado, terminará en las mismas condiciones que las actuales.
3. Es necesario instalar algún medio para medir el caudal influente a la PTAR, así como realizar determinaciones formales de calidad de agua residual influente para poder desarrollar los planes de ampliación y mejora de la PTAR.
4. El equipo de pretratamiento Ro5, empieza a presentar fallas, por lo que es necesario que entre en mantenimiento preventivo para evitar su falla total.
5. Es necesario ampliar la capacidad del tratamiento primario, pues el filtro rociador actual no tiene capacidad para tratar el caudal de diseño de 220 L/s. A esta condición se encontraría sobrecargado, con lo que tendría una baja eficiencia de remoción de contaminantes.
 - En este caso, se recomienda evaluar la conveniencia de mantener la operación del filtro biológico dado el poco mantenimiento que se le ha dado en los últimos años, además que existen tratamientos primarios más convenientes tomando en cuenta que se deberá actualizar la PTAR a la nueva norma pronto.
6. Aunque el reactor de lodos activados y el clarificador secundario cuentan con suficiente capacidad para tratar todo el caudal influente a la PTAR en la actualidad, requerirán adaptaciones para dar cumplimiento a la nueva norma. En cualquier caso, se requiere de un tratamiento primario eficiente para el correcto funcionamiento del proceso.
7. El purgado de los lodos no estabilizados dentro de predios de la PTAR, debido a las fallas del tren de lodo, representa un foco de contaminación importante. Y debe ser rehabilitado y puesto en marcha en el corto plazo.
8. El digestor de lodos actual es demasiado pequeño para estabilizar los lodos generados por la planta, por lo que es necesario aumentar su volumen.
9. Las instalaciones eléctricas actuales representan un riesgo para los trabajadores y para el funcionamiento a largo plazo de los equipos de proceso por lo que deben

rehabilitarse. El diseño de canalizaciones y registros, así como la selección de la planta de emergencia, deberá considerar las condiciones ambientales del sitio a manera de garantizar una vida útil adecuada.

- Se debe considerar tener suficientes equipos en los bombeos más relevantes de proceso para satisfacer la demanda y tener equipos de reserva para casos de fallas mecánicas.
10. Dado el potencial de reúso del agua de la PTAR San miguelito, se recomienda la instalación de una etapa de filtración terciaria.
 11. Es necesario realizar un registro más detallado de las condiciones de operación de la PTAR e implementar un programa para el monitoreo de las aguas residuales que ingresan por medio de pipas.
 12. Es necesario implementar un programa de capacitación para el personal que ingrese a las PTAR, para establecer un recurso técnico suficiente para solventar los problemas comunes que puedan surgir.
 13. La infraestructura actual de la PTAR no es capaz de dar cumplimiento a la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021 debido a limitaciones de diseño y capacidad de las unidades de proceso. Por esta razón es necesario llevar a cabo un plan de rehabilitación y ampliación de la PTAR a corto/mediano plazo considere el cumplimiento de la normativa especialmente la remoción de nitrógeno y fósforo, para lo cual se requerirá de mayor volumen de reacción en el reactor de lodos activados.
 14. Aunque no se mencionó una carencia de alcantarillado tan grande como los otros sitios de la PTAR, se debe considerar como parte de las partidas de rehabilitación, una sección para el desarrollo de la infraestructura de saneamiento como el alcantarillado.

2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el año 1985 inició operación la PTAR San Miguelito, en 1996 fue rehabilitada y se amplió su capacidad a 80 lps. En el 2002 se modernizó el sistema de aireación y alcanzó capacidad de tratamiento de 120 lps.

En 2009 inició la “Construcción de módulos de tratamiento de la PTAR San Miguelito” con el cual se realizaron avances en los años 2009-2011, lo que permitió sacar de operación módulos de tratamiento antiguos: Pretratamiento, Reactores Biológicos, Caseta de sopladores, Clarificadores secundarios, Digestor de lodos, dos pozos de infiltración y otras instalaciones auxiliares.

En el 2017 se avanzó con acciones de terminación y rehabilitación de algunos módulos.

En el 2018 y 2019 se efectuó la “Terminación de módulos de tratamiento de la PTAR “San Miguelito” (Segunda Etapa 220 L/s)”, las acciones que se ejecutaron son: Tanque de Contacto de Cloro, Caseta de Cloración, 2 pozos de infiltración, equipo para deshidratación de lodos, la galera de almacenamiento de lodos y otras instalaciones auxiliares como la planta generadora de energía eléctrica.



Figura 27 Vista actual de la PTAR San Miguelito (Cozumel)

Las acciones que se proponen para la PTAR San Miguelito consideran que el caudal medio de diseño se mantiene sin cambio respecto al actual, que es de 220 litros por segundo.

Para las plantas de la CAPA motivo de estudio, se presentó la opción de incorporar en el tren de agua un sedimentador primario o un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA), previo al reactor de lodos activados.

El RAFA con el beneficio de mayor remoción de DBO ($\approx 65\%$, contra $\approx 35\%$ del sedimentador primario), además de efectuar la estabilización anaerobia del lodo primario y purga de secundario en el RAFA. La CAPA seleccionó incorporar el sedimentador primario para PTAR San Miguelito.

En la Tabla 16 se presenta el resumen de las acciones propuestas para que la planta cumpla con las especificaciones y límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para las descargas a suelo cárstico.

Tabla 16:
Resumen de las acciones propuestas para la PTAR San Miguelito

Etapas de Tratamiento	San Miguelito
TREN DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	Existente, mejoramiento
Regulación agua cruda/pretratada	No aplica
Sedimentación primaria	Se incorpora
Filtro biológico	Se decomisiona a mediano plazo
Biológico remoción DBO	Lodos activados existente, mejoramiento
Biológica remoción de fósforo	Se incorpora
Biológico remoción nitrógeno	Se incorpora
Filtración terciaria	Se incorpora
Desinfección	Cloro gas existente, mejoramiento Definir el esquema a mediano y largo plazo.
TREN DE LODO	

Etapa de Tratamiento	San Miguelito
Espesado	Se incorpora coespesado en sedimentador primario
Digestión aerobia	Existente, mejoramiento
Digestión anaerobia	No aplica
Desaguado	Existente, mejoramiento

En la Tabla 17 se presenta la descripción y características de las acciones propuestas de rehabilitación, mejoramiento o incorporación de etapas y/o equipos para la PTAR San Miguelito.

Tabla 17:
Descripción de las acciones propuestas para la PTAR San Miguelito

Etapa de tratamiento	Con Sedimentación Primaria	Con Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente
TREN DE AGUA		
Pretratamiento	- Rehabilitar y poner en operación el pretratamiento compacto existente - Cribado medio mecánico - Desarenador - Puede ser sólo desarenador, de incorporar sedimentador primario	- Rehabilitar y poner en operación el pretratamiento compacto existente - Cribado medio mecánico - Desarenador y desengrasador - Las natas se envían por bombeo al tanque de aereación de lodo
Tratamiento Primario	- Se saca de operación el filtro biológico existente. - Requiere rehabilitar el brazo distribuidor y sustituir material de empaque intemperizado - Se incorpora sedimentación primaria de alta tasa Se elimina el bombeo intermedio, la operación de la planta continua por	- Se saca de operación el filtro biológico existente. - Requiere rehabilitar el brazo distribuidor y sustituir material de empaque intemperizado - Se incorpora Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente Se elimina el bombeo intermedio, la operación de la planta continua por

Etapa de tratamiento	Con Sedimentación Primaria	Con Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente
	gravedad Proporciona remoción del 30 % de DBO y 55-60 de SST. • Con by pass de agua pretratada al reactor de lodos activados • Se efectúa coespesado con la purga de lodo secundario • La mezcla de lodo primario y secundario se envía por bombeo al espesador de lodos, previo a digestión • Las natas primarias se envían por bombeo al digestor	gravedad Proporciona remoción del 65 % de DBO y SST. 3. Con by pass de agua pretratada al reactor de lodos activados 4. Se efectúa digestión anaerobia de la mezcla de lodo primario y secundario 5. El lodo se purga ya estabilizado, aunque con olor, por tal razón se envía a tanque de aereación de lodo (digestor existente) para eliminar mal olor y H₂S 6. Se genera biogás como subproducto de la remoción de DBO del agua residual y la estabilización de lodos • El biogás se quema para no emitir GEI's
Tratamiento Secundario Dimensiones del reactor existente: 42 x 14 x 3.7 m Sopladores existentes: 3 centrífugos multietapa, de 75 kw	1. Incorporar tanque anaerobio para remoción biológica de fósforo, de requerirse Sin información reciente de concentración de Fósforo en agua cruda 2. Incorporar tanque anóxico • Recirculación interna de licor mezclado al tanque anóxico • Mezcladores sumergibles en tanque anóxico 3. Aumentar volumen del tanque aerobio existente, volumen adicional adosado al tanque anaerobio y anóxico 4. Complementar capacidad de aereación	1. Incorporar tanque anaerobio para remoción biológica de fósforo, de requerirse Sin información reciente de concentración de Fósforo en agua cruda 2. Incorporar tanque anóxico • Recirculación interna de licor mezclado al tanque anóxico • Mezcladores sumergibles en tanque anóxico 3. Aumentar volumen del tanque aerobio existente, volumen adicional adosado al tanque anaerobio y anóxico. • Menor volumen aerobio adicional 4. Complementar capacidad de aereación • Menor requerimiento de aire
Clarificación Secundaria Diámetro: 28.5 m, SWP: 4.0 m	1. Se utilizan los dos clarificadores existentes 2. Incorporar bomba de recirculación y purga de lodo secundario, 2 + R La purga de lodo secundario se combina con el agua pretratada Se efectúa coespesado de lodo primario	1. Se utilizan los dos clarificadores existentes 2. Incorporar bomba de recirculación y purga de lodo secundario, 2 + R La purga de lodo secundario se combina con el agua pretratada Se efectúa digestión anaerobia de la

Etapa de tratamiento	Con Sedimentación Primaria	Con Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente
	y secundario en el sedimentador primario Se tendrá una corriente combinada de lodo primario, lodo secundario y los lodos descargados por las pipas. 3. Las natas secundarias se envían por bombeo al digestor	mezcla de lodo primario y secundario 3. Las natas secundarias se envían por bombeo al tanque de aereación de lodo
Tratamiento Terciario	1. Filtración terciaria • Tipo disco/tambor parcialmente sumergido, o de marco fijo, con claro de malla < 20 micras	1. Filtración terciaria • Tipo disco/tambor parcialmente sumergido, o de marco fijo, con claro de malla < 20 micras
Desinfección Dimensiones tanque existente: 30 x 10 x 2.8 m	1. Rehabilitar caseta y sistema de cloración existentes, definir el tipo: • Gas cloro, o • Hipoclorito de sodio 2. Se utiliza el tanque de contacto de cloro existente	1. Rehabilitar caseta y sistema de cloración existentes, definir el tipo: • Gas cloro, o • Hipoclorito de sodio 2. Se utiliza el tanque de contacto de cloro existente
TREN DE LODO		
Espesamiento de lodos Diámetro: 20.0 m	1. La mezcla de lodo primario y secundario extraída del sedimentador primario se envía al espesador gravitacional existente • El lodo espesado se transfiere por bombeo al digestor aerobio	1. No requiere • El lodo purgado del RAFA se envía por bombeo directo al tanque de aereación de lodo
Digestión de lodos Dimensiones del digestor: 24 x 24 x 3.5 m Sopladores existentes: 2 centrífugos multietapa, de 75 kw	1. Verificar si el volumen del digestor existente es suficiente • Podría ser suficiente si se espesa el lodo influente, definir para que flujo 2. Sopladores, verificar si los equipos existentes cubren demanda de aire • Nuevo sistema de difusores	1. No requiere, es tanque de aereación de lodo, para quitar mal olor y características corrosivas • Volumen del digestor existente es suficiente 2. Sopladores, equipos existentes cubren demanda de aire • Nuevo sistema de difusores

Etapa de tratamiento	Con Sedimentación Primaria	Con Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente
Desaguado de lodos	1. Rehabilitar y poner en operación el filtro banda existente 2. Rehabilitar y poner en operación el sistema de preparación y dosificación existente 3. Incorporar banda transportadora y tolva de lodos	1. Rehabilitar y poner en operación el filtro banda existente 2. Rehabilitar y poner en operación el sistema de preparación y dosificación existente 3. Incorporar banda transportadora y tolva de lodos
Secado adicional de lodo desaguado	1. Se utiliza la galera de lodos existente	1. Se utiliza la galera de lodos existente
TEMAS VARIOS	1. Actualizar el proyecto ejecutivo de la PTAR para adecuar el tren de agua y de lodos a los requerimientos derivados del cambio normativo, en particular la remoción de N y P. 2. Incluir medición de flujo en las corrientes de agua y lodos. 3. Incorporar medición en línea de Nitratos y Nitrógeno amoniacal para control de proceso. 4. Incluir otras acciones previstas por la CAPA:	1. Actualizar el proyecto ejecutivo de la PTAR para adecuar el tren de agua y de lodos a los requerimientos derivados del cambio normativo, en particular la remoción de N y P. 2. Incluir medición de flujo en las corrientes de agua y lodos. 3. Incorporar medición en línea de Nitratos y Nitrógeno amoniacal para control de proceso. 4. Incluir otras acciones previstas por la CAPA:

En la Figura 28 se presenta el diagrama de flujo del tren de tratamiento de agua y lodos de la PTAR San Miguelito incorporando las acciones propuestas para que la planta produzca agua tratada que cumpla con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas a suelo cárstico.

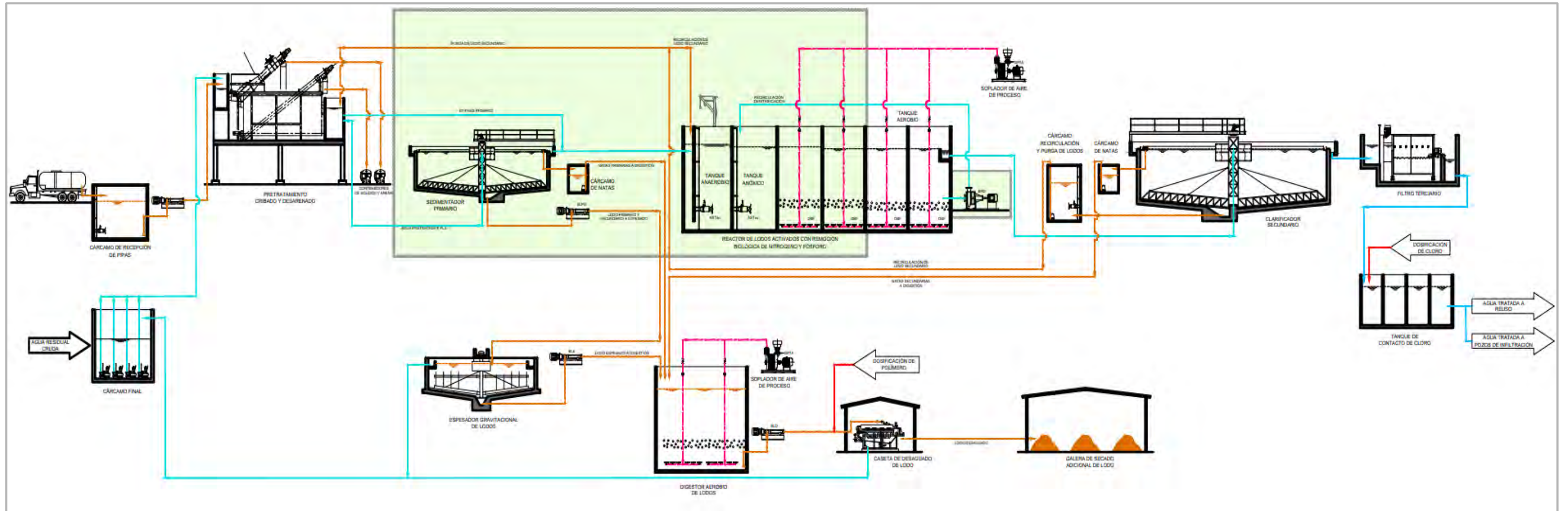


Figura 28 Diagrama de flujo de la PTAR San Miguelito, con sedimentación primaria

A decorative graphic consisting of three wavy, horizontal lines in blue, green, and grey, located on the left side of the page above the section header.

3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Las acciones de mejora surgen de la visita y diagnóstico técnico que se presenta previamente, así como de las entrevistas e información recabada con las áreas responsables de la operación y gestión de los recursos para saneamiento.

Techo financiero

El techo financiero para la implementación de las acciones de mejora y rehabilitación de la PTAR, se realizó a partir de costos paramétricos, como lo indican los Términos de Referencia.

Para lo anterior se recurrió a costos base de unidades de proceso y equipamiento similares y de capacidad comparable con las necesidades de las PTAR que forman parte de este estudio, de igual manera dichos costos son ajustados de acuerdo a la capacidad necesaria.

En la Tabla 18 se muestran los costos base por unidad de proceso, los cuales corresponden al costo de mercado establecido en proyectos realizados en el año 2021 y 2022 en Quintana Roo, en plantas de tratamiento con proceso de remoción biológica de nitrógeno y fósforo, así como equipamiento electromecánico y de proceso, tanto de tipo convencional como relativamente nuevo en la región, como es la filtración terciaria y la desinfección con lámparas ultravioleta.

Tabla 18:
Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio

Unidad de proceso	Costo base en MDP
Tren de Tratamiento de Agua	
Pretratamiento mecánico	20.97
Regulación agua cruda/pretratada	12.65
Sedimentación primaria	13.12
Caja distribuidora agua primaria	0.99
Filtro biológico	
Biológico remoción DBO	22.99
Biológico remoción de fósforo	2.50
Biológico remoción nitrógeno	5.75
Clarificación secundaria	14.80
Recirculación y purga de lodo	6.89
Filtración terciaria	12.12
Desinfección	10.49
Pozo de infiltración	1.60
Tren de Tratamiento de Lodo	
Espesado de lodo	7.79
Digestión aerobia	16.09
Digestión anaerobia	59.55
Tanque de lodo digerido	3.77
Desaguado de lodo	17.43
Cogeneración	18.81

Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con las acciones a realizar en la PTAR se estimaron los costos de inversión, esto de acuerdo con los costos base y el factor de ajuste, los cuales están relacionado con el caudal de tratamiento.

A continuación se describe el procedimiento aplicado a cada planta de tratamiento (identificada como PTAR "n") para establecer el techo financiero preliminar de los recursos económicos requeridos para implementar el plan de acciones:

1. Los costos de referencia de las unidades de proceso se ajustaron a valores de noviembre de 2022 con el factor de actualización que resulta de dividir el INPC de noviembre entre el INPC del mes en que se originó el presupuesto.

A manera de ejemplo, a continuación se describe el procedimiento:

- Fecha del presupuesto de la unidad de proceso o PTAR de referencia: octubre de 2021.

- Valor del INPC en octubre de 2021: 115.561

- Valor del INPC de noviembre de 2022: 125.997

- Factor de actualización costo de referencia: $125.997/115.561 = 1.090$

2. El costo de referencia del proceso de digestión anaerobia y del sistema de cogeneración se determina con base en un digestor anaerobio con sistemas periféricos; tamizado de lodo, tratamiento lateral de la corriente de desaguado de lodo anaerobio; antorcha de quemado de biogás, gasómetro para almacenar el biogás generado, acondicionamiento de biogás; caseta de equipos de digestión y sistema de cogeneración.

En la siguiente tabla se presenta el desglose y capacidad de los componentes de las etapas de digestión anaerobia de lodos y del sistema de cogeneración:

Etapas de Digestión Anaerobia de Lodo

Concepto	Importe actualizado, mdp
Tamizado de lodo (capacidad para 5 L/s de lodo espesado al 5%)	1.22
Digestor anaerobio mesofílico (de 5 700 m ³)	43.25
Gasómetro de membrana y periféricos (de 1.000 m ³)	6.14

Concepto	Importe actualizado, mdp
Quemador de biogás y periféricos (capacidad para 225 m ³ /h)	1.59
Edificios operativos	2.71
Tratamiento lateral del agua retirada en desaguado de lodo	4.64
Subtotal	59.55
Obra eléctrica (12 % del subtotal)	7.44
Control (3 % del subtotal + obra eléctrica)	2.01
Contingencias (8 % del subtotal + obra eléctrica + control)	5.52
Total	74.53

Sistema de Cogeneración

Concepto	Importe actualizado, mdp
Sistema de tratamiento de biogás (capacidad para 225 m ³ /h) para remoción de humedad, impurezas y H ₂ S	7.10
Sistema integral de cogeneración (capacidad de 500 kW eléctricos)	11.72
Total	18.81

El costo actualizado de las unidades de proceso se ajustó posteriormente en función de la capacidad (a caudal medio) de las unidades de proceso de la PTAR "n", en relación con la capacidad de la PTAR de referencia, acorde a lo siguiente:

$$\text{Costo PTAR "n"} = \text{Costo PTAR de referencia} * ((\text{Tamaño PTAR "n"} / \text{Tamaño PTAR referencia})^{0.70})$$

La capacidad de la PTAR de referencia es para un caudal promedio de 150 L/s.

A manera de ejemplo, al utilizar la ecuación anterior, y considerando que la PTAR "n" es de 350 L/s de capacidad, se obtiene un multiplicador de 1.81, mismo que se aplica sobre el importe de las unidades de proceso de la PTAR de referencia.

De esta forma, en lugar de ajustar el costo de la PTAR "n" con una relación lineal entre el tamaño de ambas plantas (2.33), el criterio toma en cuenta que el costo unitario de

inversión (\$ por L/s de capacidad) disminuye al aumentar el tamaño de la unidad de proceso y/o de la PTAR.

Este procedimiento de ajuste de costo se utilizó en las unidades de proceso cuyo dimensionamiento está determinado por la capacidad y carga hidráulica, como es el caso de las etapas que a continuación se indican:

- Pretratamiento (cribado y desarenación)
- Regulación y/o bombeo de agua cruda/pretratada
- Sedimentación primaria
- Caja distribuidora agua primaria
- Clarificación secundaria
- Recirculación y purga de lodo
- Filtración terciaria
- Desinfección
- Tanque de lodo digerido

Asimismo, el procedimiento de ajuste de costo descrito en este numeral también es aplicable en los procesos biológicos de tratamiento de agua y en las operaciones y procesos del tren de tratamiento de lodos, cuando en la PTAR "n" se presenta la condición de carga influente orgánica y de sólidos que se describe en el siguiente numeral.

3. El factor de ponderación arriba referido se utiliza de manera directa si la carga contaminante influente a la PTAR "n", expresada como la concentración promedio de la DBO y SST en el agua residual cruda, es comparable a la de ($\leq 20\%$) la PTAR de referencia.

La concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente a la PTAR de referencia es 350 mg/L.

Se considera que el agua residual influente a la PTAR "n" es comparable al agua residual de la PTAR de referencia, cuando la concentración promedio de DBO y SST está en el rango de $\pm 20\%$ a la concentración indicada en el párrafo previo.

4. A continuación se enlistan las operaciones y procesos del tren de tratamiento de agua y de lodos que, en caso de variación mayor al 20 % en la concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente, estarían sujetos a ajuste de costo adicional al ya aplicado en el numeral 3.
 - Filtro rociador
 - Reactor de lodos activados, remoción DBO
 - Reactor de lodos activados, remoción de fósforo
 - Reactor de lodos activados, remoción nitrógeno
 - Espesado de lodo
 - Digestión aerobia

- Digestión anaerobia
- Desaguado de lodo

En los casos en que la calidad del agua residual influente a la PTAR "n" tiene una variación superior al 20%, hacia arriba o hacia abajo, se procedió a aplicar un ajuste adicional al costo de inversión en las operaciones y procesos del listado inmediato previo.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual influente es $\approx 30\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.05 o 0.90, según corresponda.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual es $\approx 40\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.12 o 0.80, según corresponda.

5. Se aplicó un factor de ponderación para los casos en que la actividad propuesta no es una unidad de proceso nueva y completa, es decir que consiste en la rehabilitación, mejoramiento o complemento de capacidad de una etapa de proceso o unidad existente.

El valor del factor de ponderación asignado en estos casos está en el rango de 0.35 a 0.65, a criterio del especialista, en función del grado de intervención que se requiere para la unidad de proceso en cuestión.

En términos generales, los valores cercanos al límite inferior del rango se aplicaron cuando la acción implicaba rehabilitación civil única o principalmente; los valores cercanos al límite superior se aplicaron cuando la intervención implica también reequipamiento electromecánico.

6. Una vez establecido el importe de inversión por planta de las principales unidades del tren de tratamiento de agua y de lodos, para determinar el importe de otros componentes de la PTAR a dicho importe se aplicó un valor seleccionado de los rangos de porcentaje que a continuación se indican:

Equipo menor:	5 % a 8 %
Vialidades, patios y obras exteriores:	1 % a 5 %
Obra eléctrica:	10 % a 15 %
Automatización y control:	3 % a 5 %
Imprevistos y contingencias:	8 % a 12 %

7. El importe por elaboración del proyecto ejecutivo de las acciones propuestas por planta se determinó a partir de un porcentaje, en el rango del 1.2 % al 3.5 %, mismo que se aplicó

sobre el importe total estimado.

8. El costo de la supervisión de la ejecución y puesta en marcha de las obras y equipamiento propuestas en el Plan de Acciones por planta, se estableció aplicando un porcentaje del 3.5 % sobre el importe total estimado, sin incluir los importes correspondientes al costo del proyecto ejecutivo y de capacitación.

Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares

La selección de la digestión anaerobia como proceso de tratamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, orientado a la generación de biogás para su aprovechamiento, o bien la opción de instalar paneles solares en estas plantas, ha sido justificada mediante criterios técnicos específicos. Estos criterios incluyen la capacidad operativa de las plantas, la disponibilidad de espacio físico y las propiedades de la carga orgánica influente. En particular, en el caso de las PTAR ubicadas en el Estado de Quintana Roo, el contexto local en que se encuentra cada planta cobra especial relevancia, dado que las condiciones geográficas, ambientales y de infraestructura turística pueden influir en la viabilidad y eficiencia de cada tecnología implementada.

Este análisis permite una decisión fundamentada, buscando optimizar tanto el rendimiento energético como el aprovechamiento sostenible de los recursos locales.

Antecedentes

Como parte del diagnóstico para el mejoramiento de las PTAR de Quintana Roo mayores a 100 L/s, la digestión anaerobia se considera en las siguientes PTAR:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur que recibe también los lodos de la PTAR Caribe
4. PTAR Saas Tun Ha (a futuro, mediano plazo)

Adicionalmente, la instalación de paneles solares se considera en las siguientes PTAR, de las cuales las primeras tres son instalaciones existentes:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur
4. PTAR El Rey
5. PTAR Saas Tun Ha
6. PTAR San Miguelito
7. PTAR Bicentenario

8. PTAR Centenario

Digestión Anaerobia y Cogeneración

La digestión anaerobia es un proceso biológico mediante el cual los lodos residuales se descomponen en ausencia de oxígeno, generando biogás. El biogás, compuesto principalmente de metano, puede ser aprovechado para producir electricidad y calor mediante sistemas de cogeneración. Además de reducir el volumen de lodos, la digestión anaerobia permite un manejo más eficiente de los residuos, mejorando la sostenibilidad de las plantas al aprovechar el potencial energético del metano.

Los principales aspectos considerados para proponer digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás en las PTAR se presentan en seguida. Todos fueron considerados en conjunto para cada planta.

Condiciones climáticas

La temperatura está relacionada con la velocidad de las reacciones químicas. En el diseño de la digestión anaerobia, la temperatura aumenta la velocidad de hidrólisis y de formación de metano, además disminuye el mínimo tiempo de retención requerido para llegar a una destrucción de sólidos aceptable (38 % en SSV).

Para un proceso mesofílico, que es el seleccionado para las PTAR de Quintana Roo, las temperaturas óptimas se encuentran entre los 30 y 38°C (Metcalf & Eddy, 2014), lo cual es fácilmente alcanzado en la región, con temperaturas de agua residual alrededor de los 30°C todo el año. El no requerir un sistema para control fino de la temperatura es una gran ventaja de toda la zona.

Carga orgánica influente

Se requiere mantener cierta carga orgánica para mantener el equilibrio entre los microorganismos que realizan la digestión anaerobia y mantener una producción de biogás constante. La carga orgánica alimentada al digestor proviene de la fracción de SSV en los lodos generados en el proceso primario y/o secundario y éstos a su vez dependen de las características del agua residual.

En general, la carga orgánica influente necesaria proviene de un análisis detallado del proceso para cada caso, sin embargo, existen lineamientos con reglas generales para anticipar este resultado. En el caso de las PTAR de Quintana Roo, se consideraron para digestión anaerobia las PTAR que en su operación actual o a capacidad plena, recibieran más de 300 L/s o carga orgánica igual o mayor a 7.5 ton DBO/d, esto de acuerdo con estudios técnicos realizados previamente por GIZ (México, 2017).

Toxicidad

La digestión anaerobia es un proceso sensible a variaciones de pH y puede verse afectada por

la presencia de ciertas sustancias inhibidoras en las aguas residuales. Para la instalación de una nueva PTAR, es fundamental realizar análisis previos para descartar la presencia de estos compuestos que puedan interferir en el proceso. En el presente caso, dado que las PTAR evaluadas ya están en operación, se ha verificado que en los sitios propuestos para la digestión anaerobia no se han registrado historiales de inhibiciones significativas al proceso biológico, lo que garantiza su viabilidad.

Volumen y tipo de lodos generados

Una de las principales ventajas de la digestión anaerobia es la generación de biogás, siendo más eficiente esta generación cuanto mayor es la carga orgánica en los sólidos alimentados. En los sitios propuestos, además de lodos secundarios, se procesan lodos primarios con alto contenido de SSV, lo que incrementa la generación de biogás. Las altas cargas orgánicas influentes a las plantas aseguran buena generación de sólidos, maximizando la eficiencia del sistema de digestión.

Disponibilidad de espacio

Los sitios con propuesta de digestión anaerobia fueron revisados para la disponibilidad de espacio para una unidad de digestión anaerobia junto con gasómetro e instalaciones de cogeneración y manejo de biogás.

Disponibilidad operativa

La digestión anaerobia es una unidad significativamente más compleja que las demás en el tren de tratamiento, lo que demanda mayor capacidad técnica y un personal operativo especializado para su correcta operación a lo largo de la vida útil de la PTAR. En las plantas propuestas, se considera que cuentan con el personal y la capacidad técnica necesarios para implementar y mantener este proceso de manera eficiente.

Viabilidad operativa

Con base en la calidad de agua, la temperatura, el caudal influente y el tipo de proceso, es posible estimar la cantidad de lodos producidos en cada PTAR. Los lodos producidos son la base para estimar el tamaño ideal del digestor anaerobio. De acuerdo con la literatura (Metcalf & Eddy, 2014) el tiempo de retención recomendado para los lodos a 30°C es de 6 a 14 días y la carga orgánica puede variar entre los 1.6 y 4.8 kg SSV/m³ d.

A manera de ejemplo, con el volumen de 5,700 m³/d y a una carga de 2.4 kg SSV/ m³ d sería posible alimentar hasta 13.7 toneladas al día de lodo. Este flujo másico a una concentración de 3.5 % en sólidos tendría un tiempo de residencia de 14.6 días. La producción de lodo actual de las PTAR seleccionadas para digestión anaerobia varía entre 6.7 y 9.9 toneladas al día, y puede ser aún mayor de acuerdo con la capacidad de tratamiento de agua residual instalada. El volumen seleccionado considera este crecimiento además de las necesidades actuales.

Conclusiones para biogás y cogeneración

Los aspectos anteriores se analizaron y forman parte del análisis de costo presentado. En general en las PTAR seleccionadas es positiva la presencia de la digestión anaerobia. En resumen, para seleccionar las PTAR donde es viable instalar digestión anaerobia se consideró que:

1. La temperatura de la zona es favorable con 30°C.
2. La carga orgánica influente a las PTAR y/o el caudal se encuentran en el umbral de 7.5 ton/d de DBO o 300 L/s de caudal tratado.
3. Los procesos biológicos existentes no presentan obstáculos por sustancias inhibidoras.
4. La presencia de lodo primario favorece la producción de biogás.
5. Existe suficiente espacio para la instalación de las unidades respectivas.
6. Existe suficiente personal operativo y capacidad técnica para mantener la unidad funcionando eficientemente.
7. El volumen seleccionado como base para los costos cubre los rangos de operación actuales y futuros de cada PTAR.
8. En el balance económico, la producción y aprovechamiento del biogás es un instrumento importante para hacer viable la operación de las PTAR más grandes.

Generación de Energía Solar

A diferencia de la digestión anaerobia, la instalación de paneles solares es un proceso más sencillo y viable para prácticamente cualquier PTAR. El criterio principal para su implementación fue la disponibilidad de espacio en la planta y su tamaño, siendo seleccionadas aquellas de mediana o gran escala.

Las plantas que no tienen suficiente carga orgánica para justificar la digestión anaerobia, pero disponen de amplias áreas, pueden aprovechar los paneles solares para reducir su dependencia de la red eléctrica y generar energía renovable de manera sostenible. En consecuencia, esta tecnología se considera para casi todas las PTAR.

El costo de implementación de ambas tecnologías no es equivalente, siendo la digestión anaerobia considerablemente más costosa. Sin embargo, como se muestra en el análisis económico, la generación de biogás a escalas superiores al umbral establecido por la GIZ produce una cantidad significativa de energía eléctrica, generando importantes ahorros a largo plazo. Además, la digestión anaerobia requiere una mayor capacidad técnica para su operación. En contraste, los paneles solares, más sencillos de instalar y mantener, representan una opción accesible y conveniente para todas las PTAR.

A continuación se presenta una tabla resumen con los principales criterios utilizados para la selección de digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás, así como para la instalación de paneles solares.

			Principales Criterios para selección de Digestión Anaerobia					Criterio de selección para la instalación de Paneles Solares	
Nombre de la planta	Capacidad instalada (L/s)	DBO entrada (mg/L)	Carga orgánica influente (Ton DBO /día)	Carga orgánica > 7.5 ton / día	Sedimentación primaria (Lodo primario)	Disponibilidad operativa	Digestión Anaerobia	Espacio disponible	Paneles solares
San Miguelito (Cozumel)	220	439	8.4	SI	NO	NO	NO	SI	SI

Resumen de inversión, techo financiero

En la Tabla 19 se muestra el monto de inversión por unidad de proceso o componente de proyecto, y en la Figura 29 se muestra su distribución porcentual.

Tabla 19:
Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Etapa o componente	Importe PTAR San Miguelito, mdp's
Proyecto ejecutivo	1.70
Bombeo / regulación / pretratamiento / primario	29.49
Remoción DBO y nutrientes, desinfección	20.64
Tratamiento terciario	15.84
Tren de tratamiento de lodos	21.92
Digestión anaerobia	
Cogeneración	
Paneles solares	8.40
Equipo menor	6.74
Terracerías, vialidades, patios	3.85
Obra eléctrica	11.55
Automatización y control	2.89

Etapa o componente	Importe PTAR San Miguelito, mdp's
Imprevistos y contingencias	11.55
Supervisión	4.66
Capacitación	0.40
Total	139.65

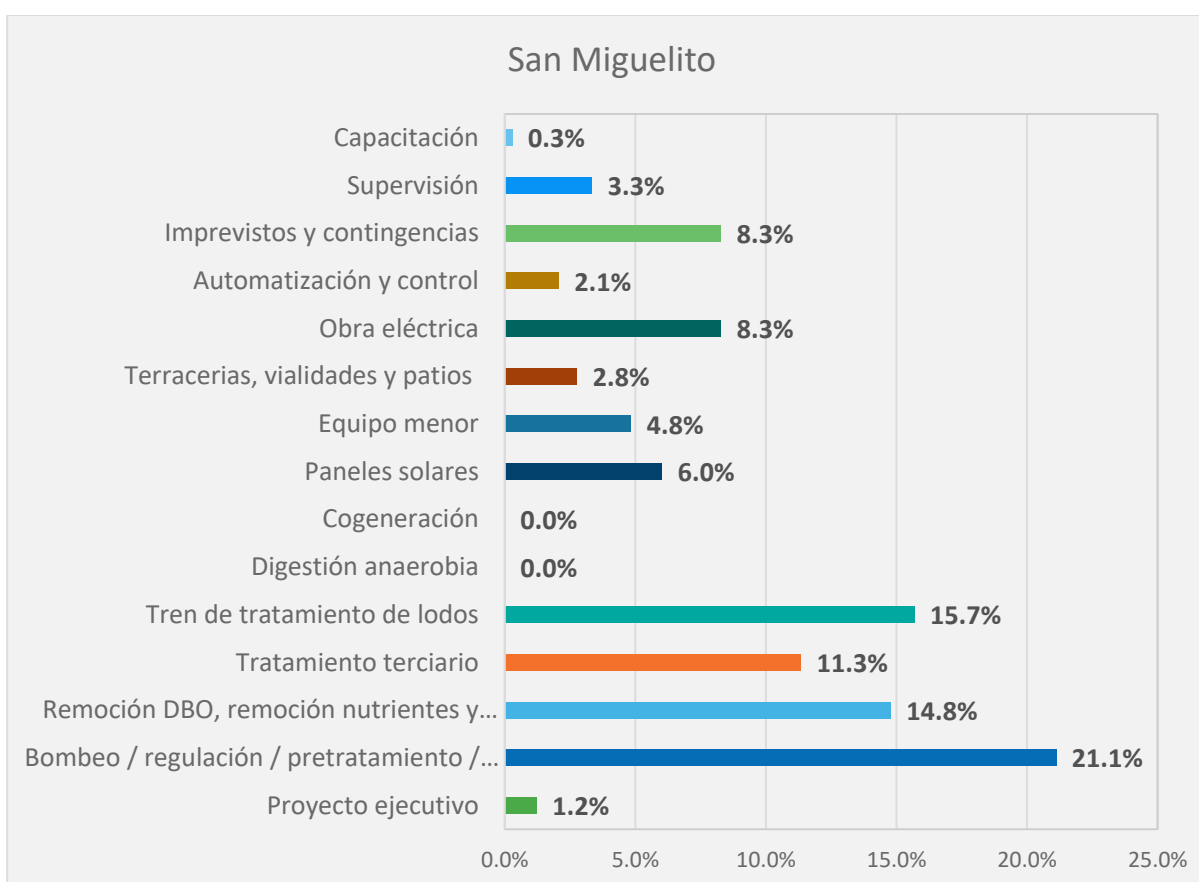


Figura 29 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

En la Tabla 20 se muestra el resumen del techo financiero total.

Tabla 20:
Monto de inversión, millones de pesos

PTAR	Capacidad instalada, L/s	Capacidad propuesta, L/s	Inversión requerida	Inversión Digestión Anaerobia	Inversión Cogeneración	Inversión Paneles solares	Inversión Total	Inversión unitaria, k\$/lps
San Miguelito	220	220	131.2			8.4	139.6	635

A continuación, se muestra la estimación detallada de costos, se describe la unidad de proceso, el factor de ajuste integrado y monto de inversión estimado, así como los porcentajes aplicados a las obras complementarias: vialidades, obra eléctrica, de control e instrumentación, imprevistos, proyecto ejecutivo, supervisión y capacitación.

Tabla 21:
Estimación detallada de costos PTAR San Miguelito

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tren de Tratamiento de Agua		
Pretratamiento mecánico	0.59	12.34
Regulación agua cruda/pretratada		
Sedimentación primaria	1.31	17.16
Caja distribuidora agua primaria		
Filtro biológico		
Biológico remoción DBO		
Biológica remoción de fósforo	1.31	3.27
Biológico remoción nitrógeno	1.05	6.01
Clarificación secundaria		
Recirculación y purga de lodo	0.65	4.50
Filtración terciaria	1.31	15.84
Desinfección	0.65	6.86
Pozos de infiltración		
Tren de Tratamiento de Lodos		
Espesado		
Digestión aerobia	0.65	10.52
Digestión anaerobia		
Tanque de lodo digerido		
Desaguado	0.65	11.40

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Cogeneración		8.40
Subtotal		96.29
Equipo menor	7.0%	6.74
Terracerías, vialidades y patios	4.0%	3.85
Obra eléctrica	12.0%	11.55
Automatización y control	3.0%	2.89
Imprevistos y contingencias	12.0%	11.55
Proyecto ejecutivo		1.70
Supervisión		4.66
Capacitación		0.40
Total		139.65

A decorative graphic consisting of three wavy, horizontal lines in blue, green, and grey, located on the left side of the page above the section header.

4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Este programa de inversiones es el resultado de las acciones propuestas para mejorar la calidad del agua tratada de las PTAR con capacidad de tratamiento igual o mayor a 100 l/s en el estado de Quintana Roo, así como el presupuesto derivado del plan de acciones. La programación de las inversiones se basa en las necesidades propias de cada planta considerando el objetivo principal, que es el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

El 5 de diciembre de 2022 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación los:

LINEAMIENTOS que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Los Lineamientos constan en total de veintitrés artículos, más un artículo transitorio, así como el denominado Anexo A: Instructivo para la Información Requerida en el Sistema.

Los Lineamientos están estructurados en seis capítulos:

- Capítulo Primero, Disposiciones Generales
- Capítulo Segundo, Requisitos para la Presentación y Registro de los Programas para el Cumplimiento

- Capítulo Tercero, De los Plazos de los Programas para el Cumplimiento
- Capítulo Cuarto, Procedimiento para la presentación, registro y revisión de los Programas para el Cumplimiento, así como del Informe de Avances
- Capítulo Quinto, De las Verificaciones
- Capítulo Sexto, De las Sanciones

Aspectos Clave de los Lineamientos

Artículo 2. Sujeto Regulado: El responsable de descargas de aguas residuales al que resulte aplicable la NOM-001-SEMARNAT-2021, quien podrá presentar sus Programas para el Cumplimiento ante la Comisión.

Artículo 5. La presentación del Programa para el Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, **es de naturaleza voluntaria**, por lo que, en caso de su incumplimiento, el responsable de la descarga de aguas residuales en cualquier cuerpo receptor propiedad de la nación, quedará sujeto a los plazos establecidos en la mencionada Norma Oficial Mexicana

Artículo 6. El Sujeto Regulado presentará su Programa para el Cumplimiento, en los siguientes supuestos:

- a) Cuando **deba modificar sus instalaciones** con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como el Apéndice Normativo de la NOM-001-SEMARNAT-2021, y que los ajustes y acciones que se deban ejecutar de acuerdo a los estudios realizados por dicho Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor, en el Artículo 2o Transitorio de la NOM, o bien,
- b) Que el Sujeto Regulado **deba modificar los procesos productivos de las actividades que generan la descarga de aguas residuales**, con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como al Apéndice Normativo y que dichas modificaciones, de acuerdo con los análisis o la evidencia del Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor.

Artículo 7. El Sujeto Regulado, en caso de presentar el Programa para el Cumplimiento lo hará por cada uno de los puntos autorizados en su Permiso de Descarga, y que, para cumplir con las disposiciones establecidas en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se ubiquen en alguno de los supuestos establecidos en el Artículo 6 de los Lineamientos.

Artículo 8. Una vez registrado el Programa para el Cumplimiento, y en tanto este se encuentre vigente, en concordancia con el Artículo 5º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, el

Sujeto Regulado deberá cumplir, además de lo comprometido en el Programa, con los límites y parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, para gozar de los beneficios e incentivos que para tales efectos establezca la LFD vigente.

Artículo 10. El Programa para el Cumplimiento, contendrá:

- Nombre, denominación o razón social del Sujeto Regulado;
- RFC del Sujeto Regulado;
- Datos de identificación del Permiso de Descarga; Volumen de descarga; Datos del medidor o dispositivo de medición de las aguas residuales descargadas; Coordenadas del punto de descarga;
- Datos generales del representante legal; Correo electrónico;
- Justificación de la solicitud para la aplicación del Programa para el Cumplimiento;
- Cronograma de actividades para las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento; Periodo solicitado;
- E-Firma del Sujeto Regulado o representante legal.

Artículo 12. Los Programas para el Cumplimiento deberán presentarse ante la CONAGUA, por el Sujeto Regulado **a partir de que entre en vigor la NOM-001-SEMARNAT-2021 y hasta el 3 de abril del 2023.**

El Sujeto Regulado que no presente su Programa para el Cumplimiento en el periodo señalado, se sujetará a los plazos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 13. Los plazos que se establezcan en el Cronograma de Actividades para el seguimiento de las acciones comprometidas en los Programas para el Cumplimiento **no deberán rebasar el 11 de marzo de 2027.**

Artículo 15. La CONAGUA realizará revisiones aleatorias a los Programas para el Cumplimiento, podrá solicitar al Sujeto Regulado, las aclaraciones o información adicional que considere necesarias. En el supuesto de que el Sujeto Regulado no atienda el requerimiento de información dentro de los veinte días hábiles siguientes, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y será aplicable lo establecido en el Artículo 2º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 16. Una vez registrado el Programa ante la CONAGUA, no será objeto de modificación, salvo en el caso que el Sujeto Regulado justifique la necesidad de realizar algún cambio y no exceda el plazo originalmente establecido.

Artículo 17. El Sujeto Regulado debe presentar **dentro de los primeros cinco días hábiles de los meses de marzo y septiembre de cada año**, a partir de la fecha del registro, el avance de actividades mediante la carga de información que solicite el Sistema de Gestión en el apartado correspondiente al Informe de Avance del Programa para el Cumplimiento. Cuando el Sujeto Regulado no envíe en tiempo y forma la información del Informe de Avance, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y se aplicarán las disposiciones de la NOM-001-

SEMARNAT-2021.

Artículo 21. La CONAGUA procederá a cancelar el Programa para el Cumplimiento y su registro, cuando compruebe que el Sujeto Regulado no ha cumplido con lo comprometido en el programa registrado. La CONAGUA, procederá a notificar la cancelación del Programa, por lo que quedarán sin efectos las acciones de cumplimiento propuestas por el Sujeto Regulado en su respectivo Programa, aplicándose las disposiciones correspondientes de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 22. Cuando las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento presentado impliquen la suspensión de sus procesos productivos y actividades para llevar a cabo las acciones tendientes a la conversión de procesos productivos o la instalación de maquinaria, equipos o plantas que se requieran para el cumplimiento de los parámetros y límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, y deba quedar fuera de operación el sistema de tratamiento de aguas residuales, el Sujeto Regulado deberá dar aviso a la CONAGUA, al menos 30 días hábiles antes de que esto ocurra, e indicar el periodo por el que prevalecerá dicha situación, el cual **no deberá exceder de tres meses**, y podrá presentarse **hasta un máximo de dos ocasiones** durante la vigencia del Programa.

De llevar a cabo la suspensión de sus procesos de tratamiento de aguas residuales sin el aviso correspondiente se aplicarán las sanciones previstas. Una vez recibida la solicitud, el Sistema de Gestión emitirá el comprobante que acreditará que la solicitud fue hecha en tiempo y forma.

Artículo 23. En caso de incumplimiento a los compromisos establecidos en el Programa para el Cumplimiento, quedan sin efecto las prerrogativas que ampara dicho documento, por lo cual el Sujeto Regulado será acreedor a las sanciones que correspondan y, en su caso, estará obligado a efectuar el pago de los derechos por el uso y aprovechamiento de cuerpos receptores de descargas de aguas residuales propiedad de la nación, a partir de la fecha del incumplimiento, así como de aquéllos que se hubieren generado con anterioridad, con sus accesorios, conforme a la LFD vigente.

Programa de inversión anual

Como se mencionó anteriormente, el monto de inversión total del Plan de Acciones es de 139.65 millones de pesos (mdp), inversión a realizarse en 5 años a partir del año 2023 hasta marzo del 2027, acorde al plazo previsto en los Lineamiento que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el presente apartado se muestra el desglose anual del Plan de Acciones, donde se describe el monto de inversión por año y unidad de proceso y/o componente del proyecto programado, así como los importes anuales y acumulados y su porcentaje de participación en la inversión.

Tabla 22:
Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
A	Proyecto ejecutivo	1.70	0.00	0.00	0.00	0.00	1.70
		100%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
B	Cárcamo, regulación, pretratamiento, y/o tratamiento primario	0.00	17.70	11.80	0.00	0.00	29.49
		0.0%	60%	40%	0.0%	0.0%	100.0%
C	Tren de tratamiento de agua	7.22	7.22	6.19	0.00	0.00	20.64
		35.0%	35.0%	30.0%	0.0%	0.0%	100.0%
D	Tratamiento terciario	0.00	0.00	0.00	15.84	0.00	15.84
		0.0%	0.0%	0.0%	100%	0.0%	100.0%
E	Tren de tratamiento de lodos	0.00	13.15	8.77	0.00	0.00	21.92
		0.0%	60%	40%	0.0%	0.0%	100.0%
F	Cogeneración (y/o paneles solares)	0.00	0.00	0.00	6.72	1.68	8.40
		0.0%	0.0%	0.0%	80.0%	20.0%	100.0%

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
G	Equipo menor	0.61	2.62	1.84	1.55	0.12	6.74
		9.1%	38.8%	27.3%	23.0%	1.7%	100.0%
H	Terracerías, vialidades y patios	0.35	1.50	1.05	0.89	0.07	3.85
		9.1%	38.8%	27.3%	23.0%	1.7%	100.0%
I	Obra eléctrica	1.05	4.49	3.15	2.66	0.20	11.55
		9.1%	38.8%	27.3%	23.0%	1.7%	100.0%
J	Automatización	0.26	1.12	0.79	0.67	0.05	2.89
		9.1%	38.8%	27.3%	23.0%	1.7%	100.0%
K	Imprevistos y contingencias	1.05	4.49	3.15	2.66	0.20	11.55
		9.1%	38.8%	27.3%	23.0%	1.7%	100.0%
L	Supervisión	0.42	1.81	1.27	1.07	0.08	4.66
		9.1%	38.8%	27.3%	23.0%	1.7%	100.0%
M	Capacitación	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.40
		0.0%	50.0%	50.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	Total anual y gran total, mdp's	12.68	54.30	38.22	32.06	2.39	139.65
	Acumulado anual, mdp's	12.68	66.98	105.20	137.26	139.65	
	Total anual y gran total, %	9.1%	38.9%	27.4%	23.0%	1.7%	100%
	Acumulado anual, %	9.1%	48.0%	75.3%	98.3%	100.0%	1.70

A continuación, se muestra de manera gráfica el monto de inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR:

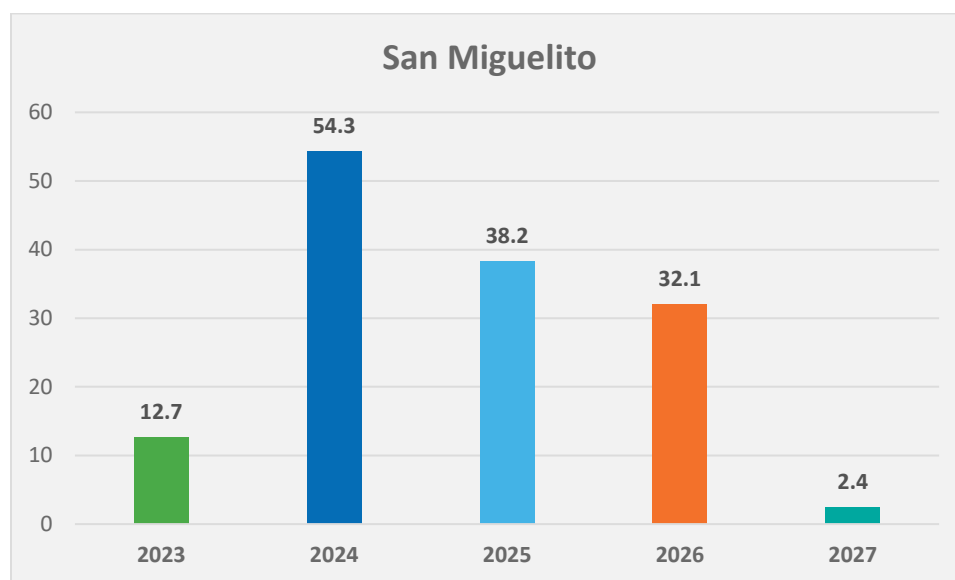


Figura 30 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Bibliografía

CONAGUA. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. . México: CONAGUA.

GIZ, C. A. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Mexico: GIZ.

Metcalf & Eddy / AECOM. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. NY: McGraw-Hill.

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4a ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.

US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Playacar

Contenido

PTAR Playacar	1
Contenido	4
Índice de Tablas	5
Índice de Figuras.....	6
1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más	8
Descripción general de la PTAR Playacar	8
Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases	9
Descripción general del proceso	10
Diagrama de flujo de proceso	11
Descripción de las unidades de proceso	12
Tren de Tratamiento de Agua	12
Tren de Tratamiento de Lodo.....	16
Estado de conservación y operación de las instalaciones.....	21
Análisis de calidad del agua cruda.....	23
Calidad de agua cruda, histórica	23
Calidad de agua cruda, de este Estudio	23
Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada.....	26
Calidad de agua tratada, histórica.....	26
Calidad de agua tratada, de este Estudio.....	28
Parámetros de operación del reactor de lodos activados	31
Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua	

.....	32
Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR	33
Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) de cada planta	33
Estimación de los costos de operación y mantenimiento	33
Observaciones y recomendaciones generales	37
2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	38
3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	43
Techo financiero	43
Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales	45
Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares	49
Resumen de inversión, techo financiero.....	53
4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	57
Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	57
Aspectos Clave de los Lineamientos	58
Programa de inversión anual	61
Bibliografía.....	64

Índice de Tablas

Tabla 1: Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR Playacar	13
Tabla 2: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua	16
Tabla 3: Dimensiones de Digestor PTAR Playacar	17
Tabla 4: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo	19

Tabla 5: Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente	25
Tabla 6: Análisis estadístico agua tratada (2021-2022)	27
Tabla 7: Caracterización del agua tratada de este Estudio (<i>E.coli</i> y Huevos de helminto)	30
Tabla 8: Cumplimiento del agua tratada	31
Tabla 9: Ubicación de pozos de infiltración PTAR Playacar	32
Tabla 10: Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales	34
Tabla 11: Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M.	35
Tabla 12: Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Playacar	38
Tabla 13: Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Playacar	39
Tabla 14: Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio	44
Tabla 15: Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	53
Tabla 16: Monto de inversión, millones de pesos.....	55
Tabla 17: Estimación detallada de costos PTAR Playacar	55
Tabla 18: Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado	61

Índice de Figuras

Figura 1 Vista Aérea PTAR Playacar	9
Figura 2 Diagrama de Flujo de Proceso Actual PTAR Playacar	11
Figura 3 Cribado grueso manual y cárcamo de agua pretratada	14
Figura 4 Reactor SBR y pozo de infiltración de agua tratada	14
Figura 5 Reactores SBR 2a Etapa, Equipado y Sin Equipar	14
Figura 6 Planta de emergencia y almacén de químicos	15
Figura 7 Digestor aerobio de Lodos y Filtro banda	18
Figura 8 Caracterización del agua cruda (sep-2022)	24
Figura 9 Calidad del agua tratada histórico (2021-2022)	28

Figura 10 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT).....	29
Figura 11 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)	30
Figura 12 Pozos de infiltración PTAR Playacar	32
Figura 13 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m ³	36
Figura 14 Diagrama de flujo de la PTAR Playacar.....	42
Figura 15 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	54
Figura 16 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	63

A decorative graphic consisting of three wavy, horizontal lines in blue, green, and grey, located on the left side of the page.

1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más

Descripción general de la PTAR Playacar

La PTAR Playacar se ubica en Playa del Carmen en el municipio de Solidaridad, y proporciona saneamiento a las aguas residuales de origen doméstico, hoteles y servicios del condominio Playacar Fases 1 y 2.

Desde su construcción y puesta en marcha fue operada por el desarrollador, a partir del 01 de septiembre de 2022 inició a operarla la empresa Ecoagua de Torreón, S.A. de C.V. filial de Tecnología Intercontinental Sociedad Anónima Promotora de Inversión de Capital Variable (TICSA) del Grupo EPM, Empresas Públicas de Medellín; TICSA se dedica al Diseño, Construcción, Puesta en Marcha, Operación y Mantenimiento de Sistemas de Tratamiento de Aguas.

TICSA actualmente es responsable de la operación y mantenimiento de la PTAR, así como del fondeo y/o obtención de los recursos económicos requeridos para su ampliación, modernización, rehabilitación y sustitución de equipos. En la Figura 1 se presenta la vista general satelital de la PTAR Playacar. El agua tratada generada por la PTAR se manda directamente a infiltración, y no tiene actualmente destinos para su aprovechamiento como agua de reúso.



Figura 1 Vista Aérea PTAR Playacar

Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases

La PTAR Playacar inició operación en el año 1992 con la Primera Etapa con una capacidad total de tratamiento de 60 L/s, esta consta de cuatro tanques, tres de ellos son reactores con capacidad de 20 L/s cada uno y uno de ellos es digestor.

Entre los años 2000-2002 se implementó la Segunda Etapa para llegar un caudal total de diseño de 150 L/s, se construyeron tres reactores más de 30 L/s cada uno, pero únicamente se equipó el aireador de uno de los reactores, por lo que la capacidad actual es de 90 L/s.

Tren de tratamiento de agua:

- + Caja de recepción (1)
- + Pretratamiento: cribado grueso manual (1).
- + Cárcamo de agua pretratada (1)
- + Reactores de lodos activados tipo biológico secuencial (SBR, por sus siglas en inglés) con aireación superficial (4)
- + Pozos de infiltración de agua tratada (2)

Tren de tratamiento de lodos:

- + Digestión aerobia, aireación superficial (1)
- + Desaguado mecánico, en filtro banda (no operativo) (1)

Descripción general del proceso

El agua cruda ingresa a una caja de recepción, la mitad llega por gravedad y el resto por bombeo, posteriormente pasa al pretratamiento consistente en cribado grueso manual, el agua pretratada es enviada a través de bombeo a los reactores biológicos secuenciales (RBS).

En el reactor tipo RBS se efectúan los procesos de llenado, reacción (aereación), sedimentación y decantación, la aereación se efectúa con aireadores superficiales. El agua decantada se envía directamente a los pozos de infiltración, en la línea de conducción se aplican pastillas de cloro para la desinfección.

Del reactor se efectúa la purga de lodo y es enviada al digestor de lodo aerobio adosado al primer tren de reactores, al igual que en los reactores, la aereación en el digestor es de tipo superficial.

Actualmente no se purga el lodo digerido de la planta, lo que ocasiona una sobrecarga en el influente de la PTAR a través del agua recuperada de la digestión que se envía al cárcamo de agua pretratada.

Diagrama de flujo de proceso

Para facilitar la comprensión de los procesos, más adelante, Figura 2 que muestra el diagrama de flujo simplificado del proceso actual de tratamiento de agua y lodos.

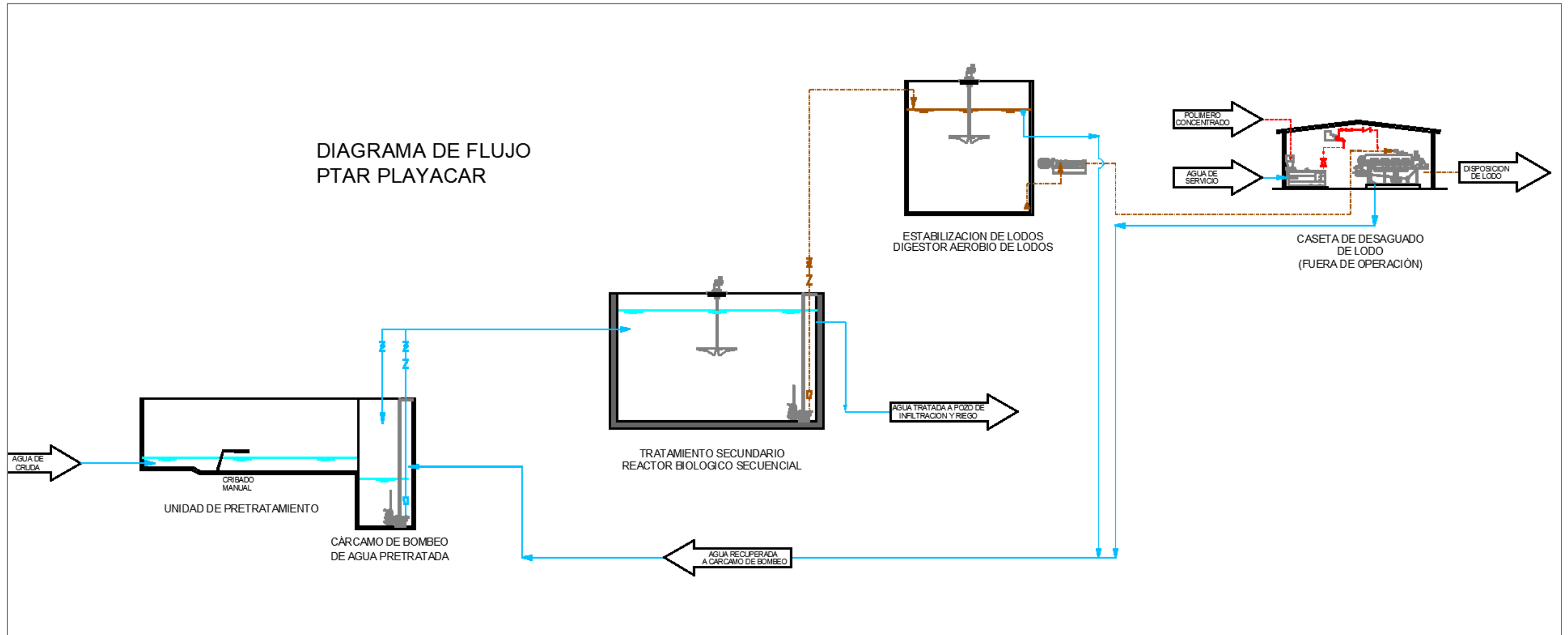


Figura 2 Diagrama de Flujo de Proceso Actual PTAR Playacar

Descripción de las unidades de proceso

Como parte del trabajo de campo elaborado en este Estudio, se recopiló información sobre las características, dimensiones y condiciones de operación y mantenimiento de las unidades de proceso de la PTAR.

Tren de Tratamiento de Agua

Pretratamiento

El agua cruda proviene de la red del fraccionamiento Playacar Fase I, en la cual se tienen dos cárcamos, llegando a la red de drenaje de Playacar Fase II que también tiene dos cárcamos, la mitad del agua del desarrollo llega por gravedad, todo ingresa a la planta de tratamiento, de donde pasa al cribado grueso manual (Figura 3) y posteriormente al cárcamo de donde se distribuye a los tres reactores biológicos del Tren de Proceso 1 y al Reactor Biológico del Tren de proceso 2.

Los Reactores Biológicos del Tren 1 y del Tren 2, cuentan con tres equipos de bombeo de 15 HP.

Reactores de lodos activados

El proceso de lodos activados consiste en reactores biológicos secuenciales por lotes (SBR). El proceso tipo SBR es una modificación de una planta de lodos activados convencional, este permite que los subprocesos de reacción, sedimentación y decantación ocurran secuencialmente en un único tanque.

El agua pretratada ingresa en un lote a un reactor, recibe tratamiento para remover y asimilar la materia orgánica y los sólidos suspendidos y luego se descarga. La homogenización de caudales, la aireación y la sedimentación se logran en ese reactor único.

La duración de los ciclos es la siguiente:

- + Llenado (preaireación) – 2 horas
- + Reacción (aireación) – 6 horas
- + Sedimentación – 0.5 horas
- + Decantación (vaciado) – 2 horas

Normalmente las dos primeras etapas varían en duración dependiendo del flujo y la carga orgánica; las dos siguientes (Sedimentación/Decantación) son de duración constante (excepto en condiciones excepcionales durante picos hidráulicos o de carga extraordinarios). Con los tiempos que operan actualmente se tienen 2 o 2.5 ciclos por día por reactor.

Los reactores de la Primera Etapa son de planta cuadrada (Figura 4) y los de la Segunda de planta hexagonal (Figura 5), sus dimensiones se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1:
Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR Playacar

Concepto	Unidad	Primera Etapa	Segunda Etapa
Número de unidades	No.	3	3 (2 sin equipar)
Planta	m	Cuadrada	Hexagonal
Longitud por lado	m	17	13
Profundidad	m	7	7
Volumen útil total	m ³	1,900	3,000

Los reactores de la Primera Etapa cuentan con aireadores superficiales de turbina con diámetro de 2.0 metros, la potencia de cada motor es de 50 hp, estos procesan un volumen de 900 m³ por ciclo.

El reactor de la Segunda Etapa cuenta con aireador superficial de turbina con diámetro de 2.5 metros con potencia de motor 100 hp, este procesa un volumen de 1,500 m³ por ciclo.

Tanto los reactores de la Primera y Segunda etapa cuentan con dos bombas de decantación cada una de 15 hp y una bomba de purga de lodo de 10 hp.

Desinfección

El agua decantada de cada reactor pasa directamente a los pozos de infiltración, no se cuenta con una unidad formal de desinfección. Anteriormente desinfectaban con hipoclorito de sodio, pero falló la bomba dosificadora, actualmente desinfectan con pastillas de cloro, sin embargo, al momento de la visita no se observaron estas pastillas.

Disposición y aprovechamiento de agua tratada

De cualquiera de los reactores el agua tratada se conduce a alguno de los dos pozos de infiltración (Figura 4). Cada pozo cuenta con un medidor de flujo para registrar el caudal ingresado a este. Existe una tercera descarga de agua tratada que se dirige a los lagos artificiales y áreas verdes del condominio, sin embargo, actualmente no se utiliza y toda el agua tratada es enviada a infiltración.

Vistas del tren de tratamiento de agua

De la Figura 3 a la Figura 6 se muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de agua de la PTAR.



Figura 3 Cribado grueso manual y cárcamo de agua pretratada

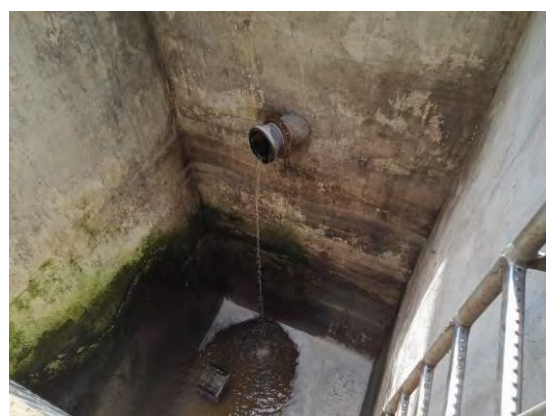


Figura 4 Reactor SBR y pozo de infiltración de agua tratada



Figura 5 Reactores SBR 2a Etapa, Equipado y Sin Equipar



Figura 6 Planta de emergencia y almacén de químicos

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua

Con el fin de verificar que las principales estructuras de proceso del tren de tratamiento de agua sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes en el agua cruda, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para tal efecto se utilizaron las dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior, los datos de caudal y calidad de agua cruda utilizados son los siguientes:

- + Caudal medio de diseño 150 L/s
- + Calidad de agua cruda, valor estudio
- + DQO, 783 mg/L
- + DBO y SST, 352 mg/L

Los valores propuestos de DBO y SST son teórico ya que sólo se tiene el dato del análisis efectuado en este Estudio y la relación obtenida entre la DBO y SST fue atípica, por lo que se propuso un valor en función de la concentración de DQO obtenida, con una relación típica de DBO/DQO de 0.45 y de DBO/SST de 1.0 (US EPA, 1993).

En la Tabla 2 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de agua, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR Playacar con las dimensiones de las estructuras, en caso de no contar con algún dato de operación se asignó un valor promedio del rango típico. Los rangos de referencia utilizados aplican para reactores biológicos secuenciales.

Tabla 2:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Playacar
Reactor de Lodos Activados			
Concentración de DBO influente al reactor	mg/L	No aplica	352
Concentración de SSTLM	mg/L	2,000 - 5,000	3,500
Fracción volátil		0.7 a 0.8	0.75
Relación F/M	kg/kg - d	0.04 a 0.1	0.20
Carga volumétrica	KgDBO/m ³ - d	0.1 a 0.3	0.52
Tiempo hidráulico de retención total	horas	15 a 40	16.1
Tirante hidráulico	m	4.5 a 7.5	7.0

Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + Con la calidad de agua cruda y condiciones evaluadas el reactor opera con carga volumétrica y relación F/M por encima de los rangos típicos recomendados.
- + Es necesario efectuar una campaña de monitoreo en el agua cruda para determinar las concentraciones de diseño para las adecuaciones que se efectúen para el cumplimiento de la nueva NOM-001.

Tren de Tratamiento de Lodo

Digestor aerobio de lodo

La purga de lodo secundario de todos los reactores se dirige hacia el digestor aerobio de lodos (Figura 4). No se cuenta con una operación de espesado previa.

El digestor cuenta con un aireador superficial de turbina de 1.5 metros de diámetro con motor de

50 hp. Las dimensiones del digestor son iguales a las de los reactores de la Primera Etapa, estas se muestran en la Tabla 3.

El lodo digerido es espesado dentro del mismo tanque, actualmente este lodo nunca se purga, el agua decantada va a la cabeza de la planta para reincorporarse al tratamiento.

Tabla 3:
Dimensiones de Digestor PTAR Playacar

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	3
Planta	m	Cuadrada
Longitud por lado	m	17
Profundidad	m	7
Volumen útil total	m ³	1,900

Desaguado de lodo

Se cuenta con un filtro banda de 1.5 metros de ancho para desaguar el lodo digerido así como una unidad de preparación de polímero para su acondicionamiento, sin embargo, actualmente se encuentran fuera de operación. Durante la visita se reportó que TICSa iniciará la operación de esta unidad.

Vistas del tren de tratamiento de lodo

En la Figura 7 se muestran unidades de proceso del tren de tratamiento de lodo de la PTAR.



Figura 7 Digestor aerobio de Lodos y Filtro banda

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de lodo

Con el fin de verificar que las principales estructuras y equipos de proceso del tren de tratamiento de lodo sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño más relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para esta evaluación se consideraron las siguientes premisas de cálculo:

- + Dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior
- + Producción de lodos, se estimó con base en la fórmula simplificada de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) con los datos de caudal medio de diseño y calidad de agua cruda promedio del histórico (SST y DBO), mismos que se utilizaron para la evaluación del tren de agua (US EPA, 1993).
- + Para determinar el volumen de lodos se utilizaron las concentraciones típicas esperadas en la purga de lodo secundario.
- + De manera conservadora, se consideró que el equipo mecánico de desaguado opera con un rango común de operación, 16 horas al día, 5 días a la semana.

En la Tabla 4 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de lodo, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR con las dimensiones de las estructuras y capacidades de equipos. En caso de no contar con algún dato de operación se consideró un valor promedio del rango típico.

Tabla 4:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Playacar
Producción de lodo			
Producción de lodo esperada	kg SST /día	No aplica	4,110
Concentración		0.5 a 1.5%	1.0%
Flujo volumétrico	m3/día	No aplica	411
Digestión Aerobia de lodo			
Concentración de lodo en tanque (por espesado de lodo)	%		2%
Volumen de lodo alimentado equivalente	m3/día		205
Tiempo de retención hidráulico (edad de lodo)	días	18 a 20	9.2
Carga de sólidos volátiles	kgSSV/m3-d	1.6 a 4.8	1.6
Destrucción esperada		38 a 50%	32%
Masa de lodo digerido estimada	kg SST /día		3,123
Desaguado de Lodo (filtro banda)			
Días de operación por semana			5
Horas de operación por día			16
Ancho de banda	m	1 a 3	1.5
Carga de sólidos (por metro)	kg/h	250 a 410	182
Carga hidráulica (por metro)	L/min	150 a 340	200
Porcentaje de captura		90 a 98%	95%

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Playacar
Concentración de lodo desaguado		12 a 22%	18%
Volumen de lodo desaguado	m ³ /día		21.7
Masa de lodo desaguado estimada	kg SST/día		2,967

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + A la condición de evaluada, el digestor aerobio de lodos no cuenta con volumen suficiente para mantener la edad de lodos recomendada de entre 18 y 20 días.
- + Para obtener una edad de lodo de 18 días se requiere espesar el lodo al 4%, para esto se requiere una unidad de proceso específica.
- + Para un caudal de 90 L/s, que es el caudal medio de operación actual, la edad de lodo en el digestor es muy probable que sea la adecuada si se realiza el espesado en esta misma unidad.
- + A la condición evaluada, con 16 horas de operación al día, los 5 días de la semana, el filtro banda operaría con cargas hidráulicas y de sólidos adecuadas para su tamaño. Por lo que se concluye que la unidad es adecuada para su objetivo, se recomienda iniciar su operación a la brevedad.

Estado de conservación y operación de las instalaciones

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de agua de la PTAR Playacar, evaluadas con base en el cumplimiento de la NOM-001-2021 para suelo cárstico en DQO, SST, NT y PT con el promedio histórico de calidad de agua, se clasifican como **“Buenas”**.

De acuerdo con el muestreo efectuado en el presente Estudio y el agua tratada observada durante la visita a la PTAR, las condiciones de operación del tren de tratamiento de agua clasifican como **“Malas”**.

En la sección **Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada**, se presenta la evaluación de dicha información.

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de lodos, determinadas con base en las condiciones operativas y de desempeño de las operaciones de espesado, digestión y desaguado observadas en la visita, se clasifican como **“Regulares a Malas”**. En términos generales las condiciones de mantenimiento de los trenes de tratamiento de agua y de lodos se consideran como **“Regulares”**. En los párrafos subsecuentes se describe lo observado en la visita técnica efectuada a la PTAR.

La PTAR Playacar es una instalación de tratamiento relativamente vieja con 28 años en operación, el diseño de sus operaciones y procesos, así como las características físicas de las unidades responden a criterios, prácticas y objetivos de tratamiento obsoletos o que ya no son aplicables, destacando los siguientes aspectos:

- + Cribado en pretratamiento de operación manual
- + Aereación mecánica en los reactores de lodos activados y digestor aerobio
- + Carencia de unidad de desinfección
- + Carencia de espesado de lodos
- + Carencia de equipos de instrumentación y control de proceso

En seguimiento de las evaluaciones realizadas, para la PTAR Playacar, destacan los siguientes aspectos de proceso:

- + La falta de purga el lodo digerido ocasiona una sobrecarga en el tren de tratamiento de agua a través del agua decantada que se retorna al proceso, por lo tanto, los reactores no tienen el desempeño adecuado y la calidad el agua tratada no es la esperada.
- + Se requiere una unidad de desinfección formal para llegar al cumplimiento de *E.coli*.

En la visita de campo se observaron los siguientes aspectos relacionados con la condición de las instalaciones de la PTAR:

- + Las condiciones de la obra civil son aceptables.
- + Los aireadores superficiales del reactor de lodos activados y digestor de lodos muestran deterioro moderado por los años y las condiciones ambientales, se les estaba dando

mantenimiento durante la visita.

- + Condiciones aceptables de operación y mantenimiento los equipos de bombeo de agua y lodos.
- + Se requiere sustitución de la bomba de hipoclorito de sodio, así como añadir una bomba de respaldo.
- + Las tuberías de conducción de agua, lodos y aire, así como soportes se encuentran en condiciones de mantenimiento aceptables.
- + El filtro banda y equipo de preparación de polímero requiere revisión y preparación para iniciar su operación.
- + La obra e instalaciones eléctricas, transformadores, Centro de Control de Motores, planta de emergencia, red de fuerza y alumbrado exterior se observan en condiciones adecuadas de mantenimiento. Los equipos más grandes, que son los aireadores cuentan con variador de frecuencia.

En el Anexo 1 (Ficha de la PTAR) se presenta la descripción detallada de las características y condiciones actuales de operación y mantenimiento de las estructuras y equipos del tren de agua y lodos.

Análisis de calidad del agua cruda

Calidad de agua cruda, histórica

El organismo operador no proporcionó datos de calidad de agua cruda.

Calidad de agua cruda, de este Estudio

Del 28 al 29 de septiembre se efectuó un muestreo compuesto de 24 horas tanto en el influente y efluente de la PTAR Playacar, este se efectuó con seis muestras simples, a cada una de estas se les realizaron los siguientes análisis de campo:

- + pH
- + Temperatura del agua
- + Cloro residual libre (efluente)

Los parámetros analizados en el laboratorio fueron los siguientes:

- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)
- + Escherichia coli (efluente)
- + Toxicidad Vibrio fischeri (efluente)
- + Huevos de helminto
- + Color verdadero (UV-Vis) a 436, 525 y 620 nm

Las actividades de colecta, preservación y análisis de las muestras fueron realizadas por personal de Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis (Intertek + ABC Analytic), éste cuenta con la acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA) en la rama de agua número AG-096-029/11 para su laboratorio ubicado en la ciudad de México y AG-096-029/11_S1 para el laboratorio de Mérida, donde se realizarán los análisis.

En todos los casos, la preservación y el almacenamiento de las muestras se efectuaron de acuerdo con los lineamientos que establece la normatividad mexicana. Las muestras colectadas fueron preservadas con hielo a una temperatura de 4°C con la intención de que no se degradaran, y fueron transportadas en una hielera al laboratorio correspondiente para su análisis.

El transporte se hizo con sumo cuidado, de tal forma que se evitaron los derrames y/o contaminación de muestras debido a rupturas de frascos o cualquier otro accidente.

Los diferentes frascos que integran las muestras se preservaron con los reactivos señalados en la normatividad.

Al final de esta sección se presentan en el Anexo 3 los resultados completos del laboratorio de la PTAR Playacar. En la Figura 8 se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Playacar.

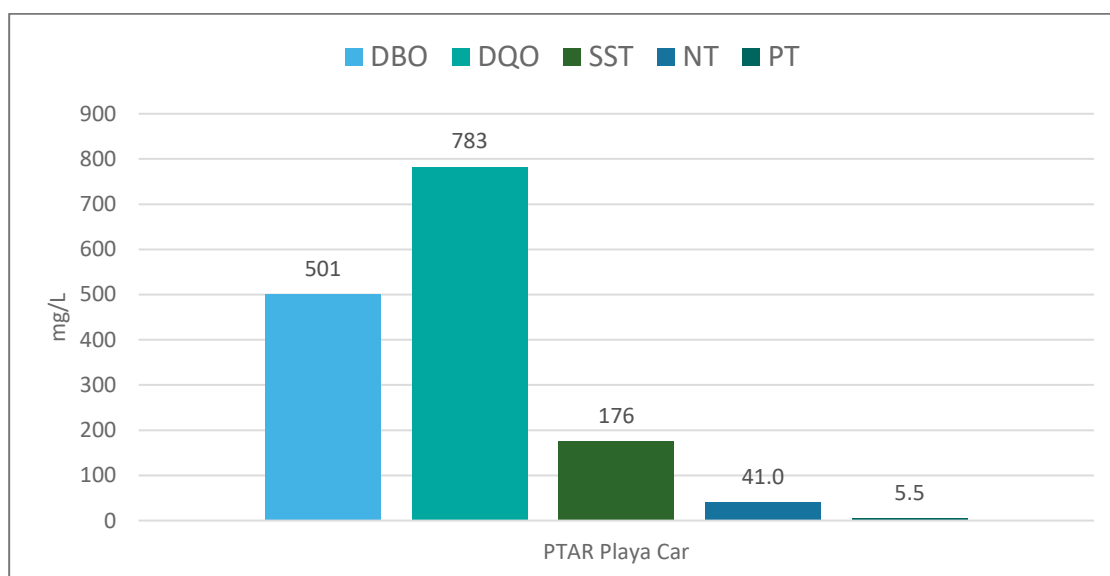


Figura 8 Caracterización del agua cruda (sep-2022)

Con la finalidad de conocer la relación de contaminantes, se realizaron los cálculos que a continuación se presentan en la siguiente tabla, los cuales fueron determinados con los promedios obtenidos anteriormente en la tabla y figura previas.

Tabla 5:
Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente

Relación	Valor Estudio 2022	Rango típico en Aguas Residuales Municipales ¹
DBO5/ DQO	0.64	0.45 – 0.55
SST/ DBO	0.35	0.80 – 1.20
NTK/ DBO	0.08	0.10 – 0.20
Fósforo/ DBO	0.01	0.02

¹ (US EPA, 1993)

De las relaciones anteriores resalta SST/DBO, se obtuvo un valor muy bajo de SST. La relación de DBO/DQO es más alta de lo esperado y las concentraciones de nutrientes son bajas en comparación con los rangos típicos para aguas residuales municipales.

Se requieren más datos para poder determinar con certeza la calidad de agua cruda y sus relaciones entre parámetros, como se mencionó anteriormente, es necesario realizar una campaña de monitoreo del agua cruda para poder ajustar el diseño para el cumplimiento de la nueva NOM-001.

Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada

En las siguientes figuras y tablas se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada del histórico de datos proporcionados por el organismo operador y de los obtenidos en el presente Estudio, en estas se presentan los límites permisibles (LP) establecidos en la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelo cárstico.

Calidad de agua tratada, histórica

Se incluyen diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos, la información fue proporcionada por el organismo operador, los análisis fueron efectuados por un laboratorio acreditado ante la EMA. Se proporcionaron datos de 47 muestreos compuestos efectuados en las tres decargas de agua tratada durante el periodo del año 2021 al 2022.

Los parámetros incluidos en las bases de datos de la PTAR Playacar son los siguientes:

- + Temperatura
- + pH: Potencial de hidrógeno
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos sedimentables
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Fósforo total (PT)
- + Coliformes fecales
- + Huevos de helminto
- + Arsénico
- + Cadmio
- + Cianuro
- + Cobre
- + Cromo
- + Mercurio
- + Níquel
- + Plomo
- + Zinc

Debido a que los resultados de los muestreos fueron previos a la actualización de la NOM-001-SEMARNAT-2021, las bases de datos no incluyen los parámetros adicionales de la nueva norma, como color verdadero, toxicidad y *E. Coli*, así mismo incluyen parámetros que no son objeto de estudio en la actual norma, sin embargo, si permiten determinar la calidad de los procesos de

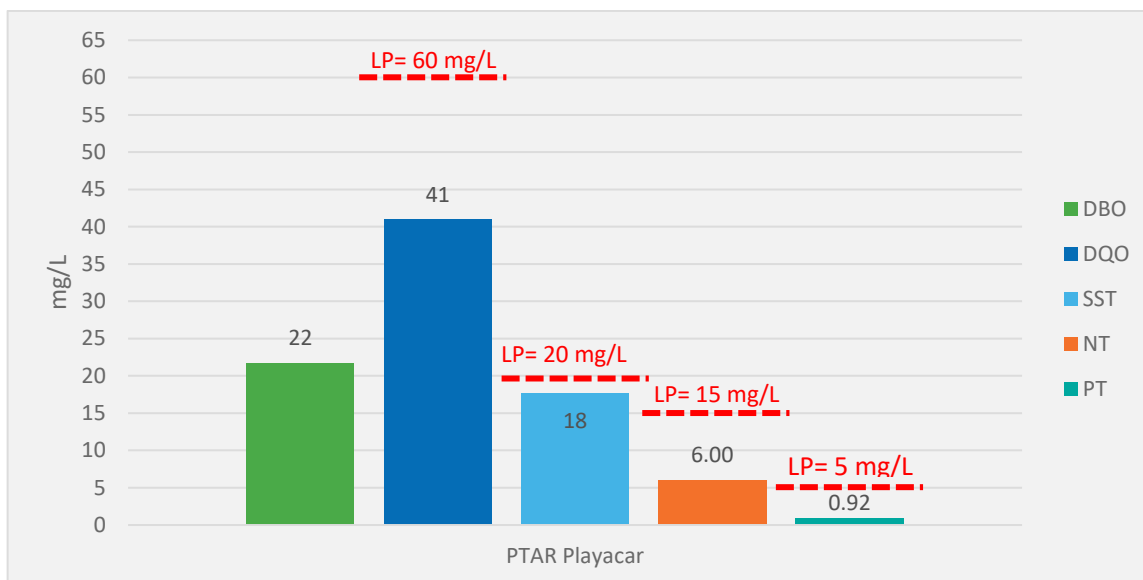
tratamiento del agua residual.

En la siguiente tabla se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros en el agua tratada de la PTAR Playacar.

Tabla 6:
Análisis estadístico agua tratada (2021-2022)

Concepto	SST mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	G & A mg/L	NT mg/L	PT mg/L	Coliformes fecales (NMP, 100 mL)
No. De datos	47	47	47	47	47	47	47
Mínimo	10	7	12	8	1.87	0.29	3
1° cuartil	10	11	18	8	2.65	0.30	3
Promedio	18	22	41	10	6.08	0.93	3
Mediana	11	14	22	10	3.82	0.55	3
3° cuartil	24	30	52	10	10.25	1.68	3
Máximo	43	55	134	13	13.46	2.36	6

A manera de resumen en la Figura 9 se presentan los valores promedio de los principales parámetros del agua tratada de la PTAR Playacar, en esta se indican los límites permisibles (LP) para el promedio mensual en la NOM-001-2021.

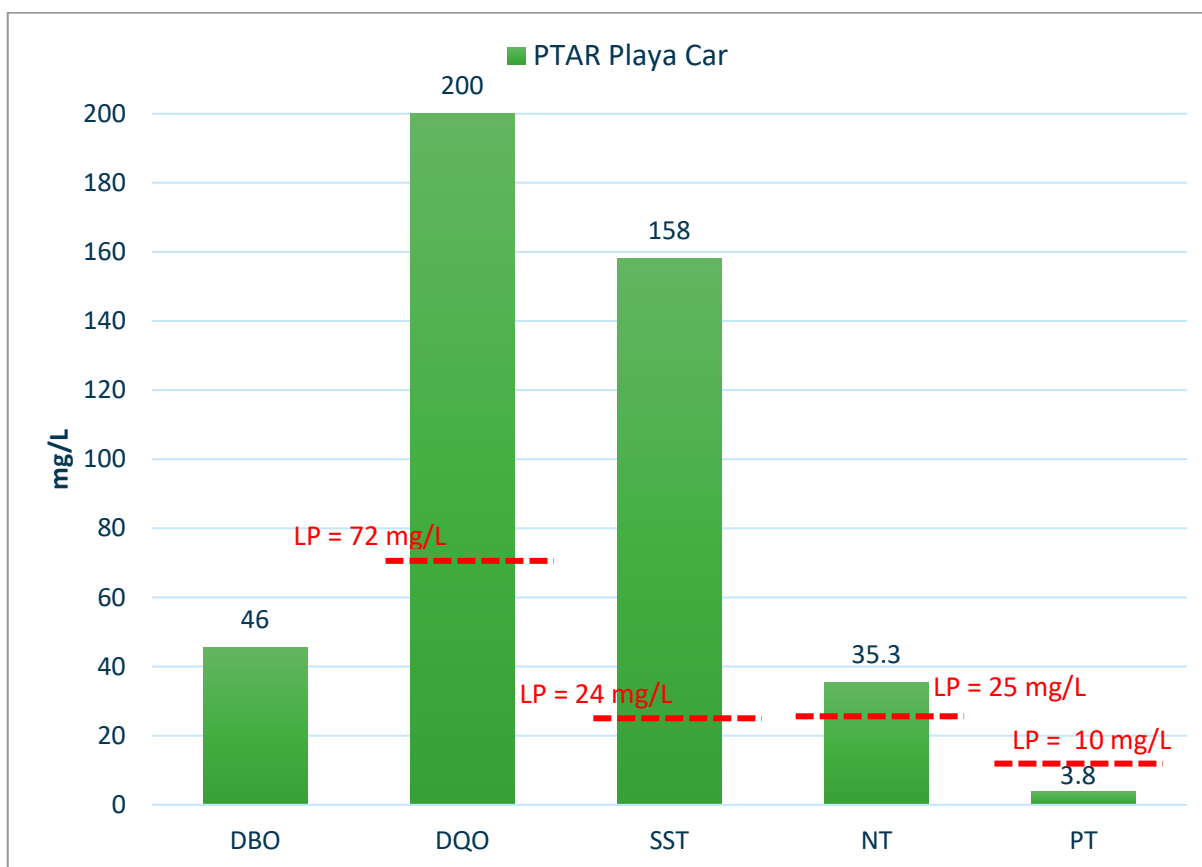


LP = Límite permisible

Figura 9 Calidad del agua tratada histórico (2021-2022)

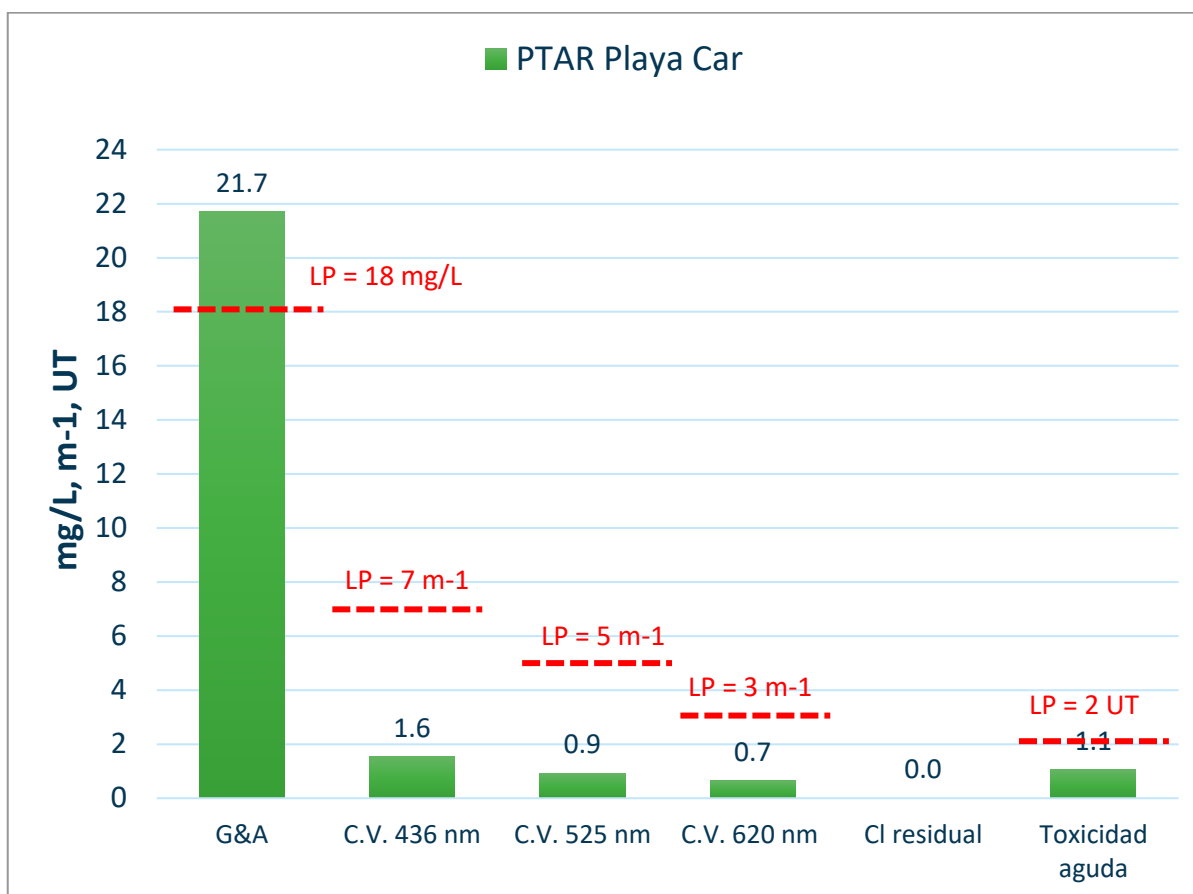
Calidad de agua tratada, de este Estudio

En la siguientes figuras y tabla se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada de la PTAR Playacar, en estas se indican los límites permisibles para el promedio diario en la NOM-001-2021.



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 10 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 11 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)

Tabla 7:
Caracterización del agua tratada de este Estudio (*E.coli* y Huevos de helminto)

Parámetro	Unidades	PTAR Playacar	Límite permisible NOM-001-2021
E.coli	NMP/100 mL	>24,000	100
Huevos de helminto	HH/L	<0.2	1

Con la información histórica de calidad de agua tratada proporcionada por el organismo operador y los resultados de los análisis efectuados se efectuó el análisis del cumplimiento de

los principales parámetros de calidad del agua con respecto a la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021, para los valores de los datos históricos se utilizó el límite permisible del valor promedio mensual y para los resultados de los muestreos efectuados en este estudio se utilizó el límite permisible del valor promedio diario.

Tabla 8:
Cumplimiento del agua tratada

Parámetro	Valor promedio histórico (2021-2022) (mg/L)	Valor Estudio 2022 (mg/L)	Límite permisible NOM-001-2021	Cumple
SST	18	158	PM = 20 (mg/L) PD = 24 (mg/L)	SI NO
DQO	41	200	PM = 60 (mg/L) PD = 72 (mg/L)	SI NO
Nitrógeno total	6.0	35.3	PM = 15 (mg/L) PD = 25 (mg/L)	SI NO
Fósforo total	0.9	3.8	PM = 5 (mg/L) PD = 10 (mg/L)	SI

PM = promedio mensual, PD = promedio diario

Con respecto al color verdadero en las tres longitudes de onda así como para la toxicidad se obtuvieron valores dentro del límite permisible, la concentración de *E. Coli* estuvo por encima del límite permisible dado que no estaban aplicando cloro durante el muestreo.

Parámetros de operación del reactor de lodos activados

El organismo operador no permitió el análisis de los parámetros de operación de los reactores de lodos activados.

Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua

Como parte de las actividades realizadas en campo, se registraron las coordenadas de los pozos de infiltración de cada PTAR, utilizando un equipo GPS map 60Cx marca Garmin. En la Tabla 9 se presentan las coordenadas de localización de los pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR Playacar. Posteriormente, en la Figura 12 se presentan fotografías correspondientes al levantamiento de las coordenadas con GPS y de los registros o brocales de los pozos de infiltración.

Tabla 9:
Ubicación de pozos de infiltración PTAR Playacar

Concepto	Latitud	Longitud
Pozo de infiltración 1	20.6145808	-87.0929152
Pozo de infiltración 2	20.615200	-87.092400

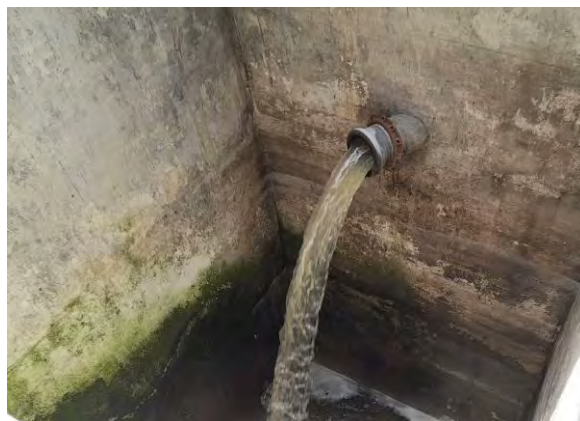


Figura 12 Pozos de infiltración PTAR Playacar

Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR

El desarrollo Playacar tiene una red de drenaje de longitud de 4 km. El agua cruda proviene de la red del fraccionamiento Playacar Fase I, del cual salen de dos cárcamos, llegando a la red de drenaje de Playacar Fase II, donde existen dos cárcamos.

El cárcamo de la casa Club, recibe la parte hotelera y las descargas de Fase I.

Pendiente de completar, no se ha recibido la información por parte del organismo operador.

Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) de cada planta

No se proporcionaron datos por parte del organismo operador.

Estimación de los costos de operación y mantenimiento

Si bien la entidad responsable de la operación y mantenimiento de la PTAR Playacar no proporcionó información de dichos costos, se procedió a estimar los costos anuales de un grupo de insumos relevantes:

- + Energía eléctrica,
- + Cloro para desinfección,
- + Polímero para espesado y/o desaguado de lodo,
- + Acarreo de lodo desaguado, y
- + Análisis de laboratorio de agua tratada y lodo para cumplimiento normativo y control de proceso
- + Personal de O & M

Para lo anterior, con base en un caudal medio de 90 L/s y la calidad de agua cruda que se propuso y la información de calidad de agua tratada que se recabó, se efectuó un balance de materia simplificado para establecer la masa de DBO removida, la generación de lodos en el proceso de tratamiento, la remoción de sólidos suspendidos volátiles en el proceso de digestión y la masa de lodo desaguado a disposición.

Una vez definidos en el balance de materia los valores requeridos, se procedió a aplicar los factores de dosificación o consumo de los principales insumos (energía eléctrica, cloro

polímero para espesado y/o polímero para desaguado) con base en la masa de lodo generada y las prácticas adecuadas de operación. En el caso de los análisis de laboratorio de agua tratada y lodos, a partir de los requerimientos normativos.

En la Tabla 10 se presentan las consideraciones aplicadas para establecer el consumo de los insumos arriba indicados, así como el costo unitario asignado:

Tabla 10:
Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Energía eléctrica	Caudal medio de agua tratada y concentración promedio de DBO	2.08 kWh/kgDBO	2.50 \$/kWh
Cloro	Caudal medio de agua tratada	5.0 mg/L	20 \$/kg
Polímero para espesado	Producción de lodo con base en caudal medio y concentración promedio de DBO y SST	No aplica, se espesa en el propio digestor, sin dosificación de polímero	No aplica
Polímero para desaguado	Fracción volátil del 75 % del lodo producido y remoción del 40 % de SSV en digestor	7.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Acarreo lodo desaguado, base húmeda	Lodo desaguado al 20 % de sólidos Masa de lodo en base seca/0.20	Ton de lodo en base húmeda	150 \$/ton
Análisis laboratorio Agua tratada	NOM-001 población > 50 mil habitantes	2 muestreos/mes	8,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Lodo / biosólidos	NOM-004 hasta 1,500 ton/año (base seca);	1 muestreo/año	10,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Control de proceso	---	1 lote por mes	6,000 \$/mes

El costo del mantenimiento preventivo de la PTAR y los consumibles asociados a esa actividad se estimó aplicando el criterio de destinar un importe anual equivalente al 0.85 % del costo de inversión de la planta con sus actuales características. El costo de la planta se estableció a partir de un costo base de 750 mil pesos por litro – segundo de capacidad media instalada.

Para establecer el costo del personal de operación y mantenimiento se considera una plantilla “tipo” de doce personas, misma que se desagrega en las siguientes plazas: 1 Jefe de planta, 2 Supervisores de operación/mantenimiento, 5 operadores y 4 auxiliares de operación o mantenimiento.

Los sueldos considerados para establecer este rubro de costo están en el rango de 28,000 pesos mensuales para el Jefe de planta y de 12,000 pesos por mes para el auxiliar de operación, los sueldos del resto del personal están comprendidos dentro de este rango.

Los sueldos nominales se afectaron por un factor de 1.50 para incorporar el costo de las diversas prestaciones y seguridad social del personal. De esta forma se determinó un costo total mensual de\$ 306, 000 por concepto de personal.

Con el factor unitario de consumo de energía eléctrica asignado se estimó la energía consumida por la planta, así como otros dos indicadores que en la PTAR Playacar tienen el siguiente valor:

- + Consumo unitario de energía: 0.47 kWh/m³
- + Potencia media de operación: 384 kilowatts

En la Tabla 11 se presentan los consumos e importes anuales de los rubros de costo establecidos, así como el costo unitario de cada rubro, al dividir su importe anual entre el volumen de agua tratada. Posteriormente, en la Figura 13 se presenta de manera gráfica el costo unitario desagregado por insumo.

Tabla 11:
Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M

Insumo	Consumo anual	Importe anual \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Energía eléctrica	1,346,007	3,365,017	1.19
Cloro	14,191	283,824	0.10
Polímero para espesado	---	---	0.00

Insumo	Consumo anual	Importe anual \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Polímero para desaguado	4,125	618,680	0.22
Acarreo lodo desaguado	2,578	386,675	0.14
Análisis laboratorio		274,000	0.10
Mantenimiento		510,000	0.18
Personal de O & M		3,672,000	1.29
Total		9,110,196	3.21

Energía eléctrica consumo anual expresado en kWh; cloro, polímero para espesado y polímero para desaguado, en kg; acarreo de lodo, en toneladas.

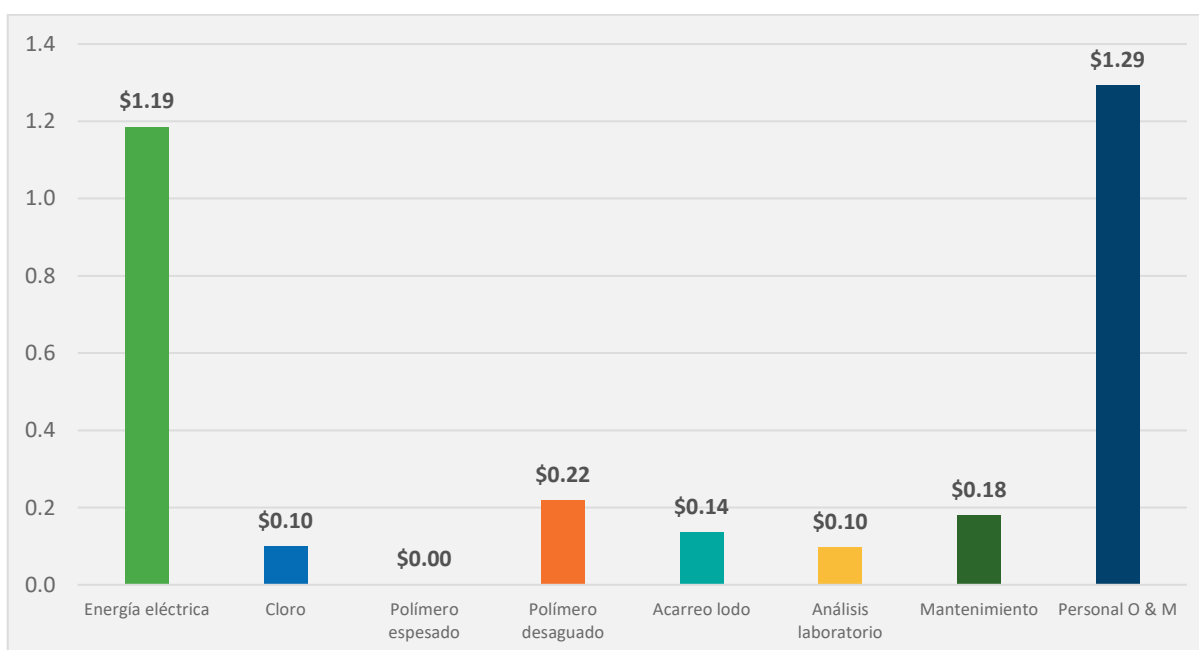


Figura 13 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m³

El importe anual de operación y mantenimiento estimado en esta sección es de 9.11 millones de pesos, con un costo unitario de O & M de 3.21 \$/m³ de agua tratada.

Observaciones y recomendaciones generales

A continuación se presentan las observaciones y recomendaciones que se desprenden de la evaluación de la información proporcionada por el organismo operador y del diagnóstico en campo y gabinete de la PTAR Playacar:

1. Efectuar campaña de monitoreo de agua cruda y agua tratada con un laboratorio acreditado distinto al que contrata el organismo operador normalmente para tener otros valores de referencia.
2. Por el tamaño de planta se recomienda incorporar cribado y desarenado de tipo automático con manejo de residuos sólidos y arenas, además de remoción de grasas ya que la PTAR recibe agua residual de hoteles con restaurantes.
3. Es necesario incorporar un sistema de remoción de nitrógeno formal para dar cumplimiento a la NOM-001-SEMARNAT-2021. Esto implicará incorporar agitadores sumergibles en los reactores para aumentar una etapa anóxica, además de diversas modificaciones operativas como el aumento en caudal de aire ingresado y tiempos de cada etapa. Dependiendo de la caracterización de agua cruda que se obtenga, es probable que se requiera habilitar otro de los reactores de la segunda etapa.
4. De acuerdo con la caracterización de agua cruda y tratada de este Estudio no será necesaria la incorporación de una unidad adicional para la remoción de fósforo, es necesario confirmarlo con una campaña de monitoreo.
5. En general, se recomienda realizar un mantenimiento general a rastras, mamparas, vertedores y conexiones internas y conducciones, para garantizar su funcionamiento adecuado.
6. Incorporar unidad de desinfección formal con hipoclorito de sodio o rayos ultravioleta.
7. Dado el potencial de reúso que se tiene para riego de campo de golf y arquitectura del paisaje dentro del condominio, se recomienda incorporar filtración terciaria.
8. Añadir unidad de espesado mecánico para lograr la destrucción de SSV requerida en el digestor.
9. Rehabilitar e iniciar la operación del filtro banda y equipo de preparación de polímero existentes.



2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Las acciones que se proponen para la PTAR Playacar consideran que el caudal medio de operación se mantiene sin cambio respecto al actual, con capacidad nominal para 90 litros por segundo.

En la Tabla 12 se presenta el resumen de las acciones propuestas para que la planta pueda cumplir con las especificaciones y límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para las descargas a suelo cárstico.

Tabla 12:
Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Playacar

Etapa de Tratamiento	PTAR Playacar
TREN DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	Se incorpora
Regulación agua cruda/pretratada	No aplica
Sedimentación primaria	No aplica
Filtro biológico	No aplica
Biológico remoción DBO	Existente, mejoramiento
Biológico remoción nitrógeno	Se incorpora

Etapa de Tratamiento	PTAR Playacar
Filtración terciaria	No aplica
Desinfección	Pastillas de hipoclorito existente, mejoramiento
TREN DE LODO	
Espesado	Se incorpora
Digestión aerobia	Existente
Digestión anaerobia y cogeneración	No aplica
Desaguado	Existente, mejoramiento y puesta en operación

En la Tabla 11 se presenta la descripción y características de las acciones propuestas de rehabilitación, mejoramiento o incorporación de etapas y/o equipos para la PTAR Playacar.

Tabla 13:
Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Playacar

Etapa de tratamiento	Playacar
TREN DE AGUA	
Pretratamiento	1. Incorporar cribado grueso, cribado fino, desarenación y desengrasado 2. Manejo de residuos sólidos y arenas
Tratamiento Primario	1. No aplica
Tratamiento Secundario	1. Equipar y poner en operación el quinto reactor para tener capacidad de tratar toda el agua residual, ya que se requerirán ciclos más largos para efectuar la remoción de nitrógeno.

Etapa de tratamiento	Playacar
	Incorporar agitadores sumergibles en los cinco reactores para la etapa de reacción sin aereación para remover nitrógeno.
Clarificación Secundaria	No aplica
Tratamiento Terciario	- Filtración terciaria, en caso de reúso de agua tratada. - Con capacidad hidráulica para las horas efectivas de descarga de reactores. - Alto potencial de reúso, la planta está frente a un campo de golf que anteriormente aprovechaba el agua tratada en riego
Desinfección	- Incorporar sistema de desinfección, preferente UV o solución de hipoclorito - Por ubicación de la planta no manejar gas cloro - Incorporar tanque de contacto de cloro
TREN DE LODO	
Espesamiento de lodos	Incorporar equipo de espesado de lodos para asegurar la edad de lodos requerida
Digestión de lodos	- No requiere acciones - Verificar si el volumen es suficiente para la edad de lodos requerida.
Desaguado de lodos	- Rehabilitar y poner en operación el filtro banda existente, - Rehabilitar y poner en operación el sistema de preparación y dosificación de polímero
Secado adicional de lodo desaguado	No aplica
TEMAS VARIOS	- Incluir medición de flujo en las corrientes de agua y de lodo. - Automatizar la carga y ciclos de operación de los reactores SBR para una eficiente operación y remoción de nutrientes

Etapa de tratamiento	Playacar
	3. Incluir sensores en reactores SBR y agua clarificada; para monitoreo y control de proceso, 4. Rehabilitación general de la PTAR

A continuación, en la Figura 14 se presenta el diagrama de flujo del tren de tratamiento de agua y de lodos de la PTAR Playacar incorporando las acciones propuestas para que la planta produzca agua tratada que cumpla con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas a suelo cárstico.

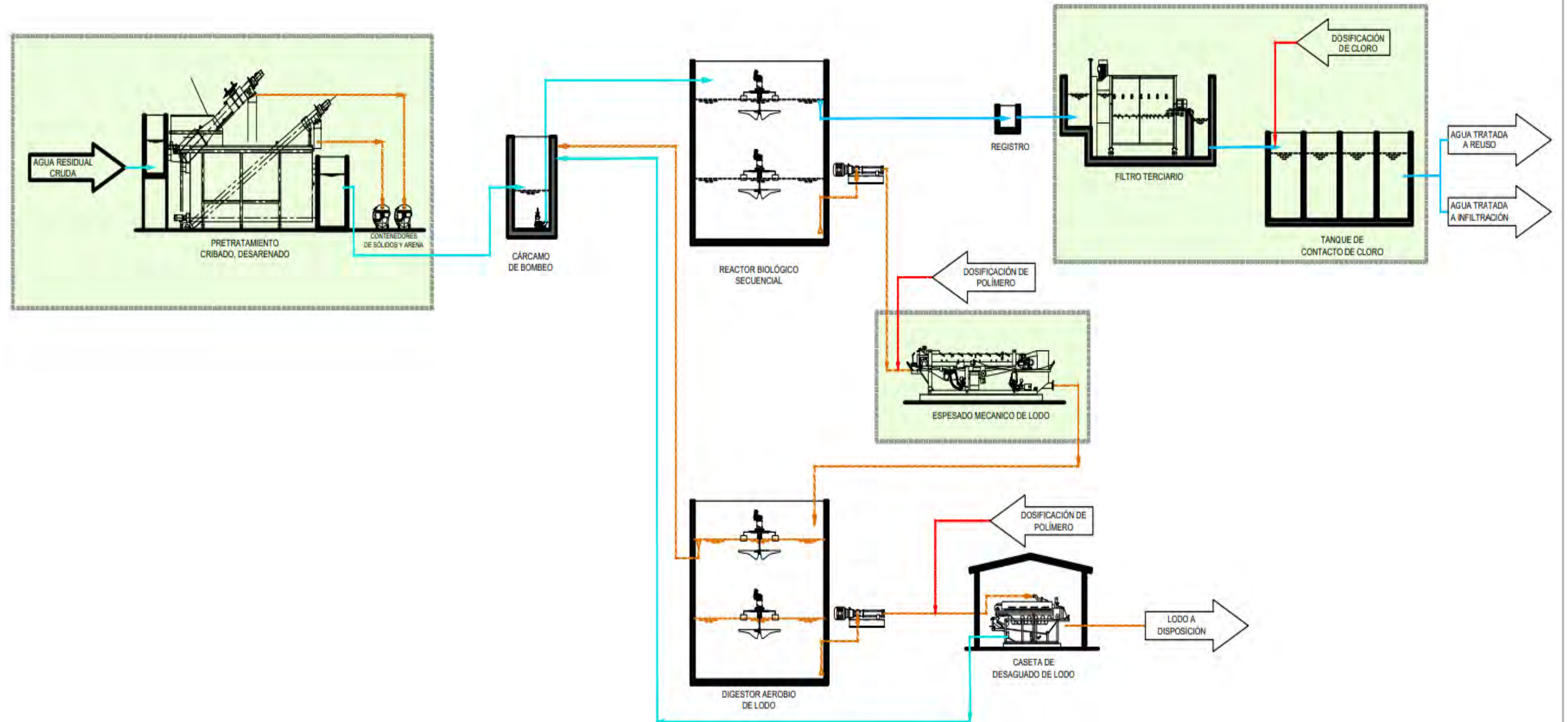


Figura 14 Diagrama de flujo de la PTAR Playacar

A decorative graphic consisting of three wavy, horizontal lines in blue, green, and grey, located on the left side of the page.

3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Las acciones de mejora surgen de la visita y diagnóstico técnico que se presenta previamente, así como de las entrevistas e información recabada con las áreas responsables de la operación y gestión de los recursos para saneamiento.

Techo financiero

El techo financiero para la implementación de las acciones de mejora y rehabilitación de la PTAR, se realizó a partir de costos paramétricos, como lo indican los Términos de Referencia.

Para lo anterior se recurrió a costos base de unidades de proceso y equipamiento similares y de capacidad comparable con las necesidades de las PTAR que forman parte de este estudio, de igual manera dichos costos son ajustados de acuerdo a la capacidad necesaria.

En la Tabla 14 se muestran los costos base por unidad de proceso, los cuales corresponden al costo de mercado establecido en proyectos realizados en el año 2021 y 2022 en Quintana Roo, en plantas de tratamiento con proceso de remoción biológica de nitrógeno y fósforo, así como equipamiento electromecánico y de proceso, tanto de tipo convencional como relativamente nuevo en la región, como es la filtración terciaria y la desinfección con lámparas ultravioleta.

Tabla 14:
Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio

Unidad de proceso	Costo base en MDP
Tren de Tratamiento de Agua	
Pretratamiento mecánico	20.97
Regulación agua cruda/pretratada	12.65
Sedimentación primaria	13.12
Caja distribuidora agua primaria	0.99
Filtro biológico	
Biológico remoción DBO	22.99
Biológico remoción de fósforo	2.50
Biológico remoción nitrógeno	5.75
Clarificación secundaria	14.80
Recirculación y purga de lodo	6.89
Filtración terciaria	12.12
Desinfección	10.49
Pozo de infiltración	1.60
Tren de Tratamiento de Lodo	
Espesado de lodo	7.79
Digestión aerobia	16.09
Digestión anaerobia	59.55
Tanque de lodo digerido	3.77
Desaguado de lodo	17.43
Cogeneración	18.81

Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con las acciones a realizar en la PTAR se estimaron los costos de inversión, esto de acuerdo con los costos base y el factor de ajuste, los cuales están relacionado con el caudal de tratamiento.

A continuación se describe el procedimiento aplicado a cada planta de tratamiento (identificada como PTAR "n") para establecer el techo financiero preliminar de los recursos económicos requeridos para implementar el plan de acciones:

1. Los costos de referencia de las unidades de proceso se ajustaron a valores de noviembre de 2022 con el factor de actualización que resulta de dividir el INPC de noviembre entre el INPC del mes en que se originó el presupuesto.

A manera de ejemplo, a continuación se describe el procedimiento:

- Fecha del presupuesto de la unidad de proceso o PTAR de referencia: octubre de 2021.
- Valor del INPC en octubre de 2021: 115.561
- Valor del INPC de noviembre de 2022: 125.997
- Factor de actualización costo de referencia: $125.997/115.561 = 1.090$

2. El costo de referencia del proceso de digestión anaerobia y del sistema de cogeneración se determina con base en un digestor anaerobio con sistemas periféricos; tamizado de lodo, tratamiento lateral de la corriente de desaguado de lodo anaerobio; antorcha de quemado de biogás, gasómetro para almacenar el biogás generado, acondicionamiento de biogás; caseta de equipos de digestión y sistema de cogeneración.

En la siguiente tabla se presenta el desglose y capacidad de los componentes de las etapas de digestión anaerobia de lodos y del sistema de cogeneración:

Etapas de Digestión Anaerobia de Lodo

Concepto	Importe actualizado, mdp
Tamizado de lodo (capacidad para 5 L/s de lodo espesado al 5%)	1.22
Digestor anaerobio mesofílico (de 5 700 m ³)	43.25
Gasómetro de membrana y periféricos (de 1.000 m ³)	6.14
Quemador de biogás y periféricos (capacidad para 225 m ³ /h)	1.59

Concepto	Importe actualizado, mdp
Edificios operativos	2.71
Tratamiento lateral del agua retirada en desaguado de lodo	4.64
Subtotal	59.55
Obra eléctrica (12 % del subtotal)	7.44
Control (3 % del subtotal + obra eléctrica)	2.01
Contingencias (8 % del subtotal + obra eléctrica + control)	5.52
Total	74.53

Sistema de Cogeneración

Concepto	Importe actualizado, mdp
Sistema de tratamiento de biogás (capacidad para 225 m ³ /h) para remoción de humedad, impurezas y H ₂ S	7.10
Sistema integral de cogeneración (capacidad de 500 kW eléctricos)	11.72
Total	18.81

El costo actualizado de las unidades de proceso se ajustó posteriormente en función de la capacidad (a caudal medio) de las unidades de proceso de la PTAR "n", en relación con la capacidad de la PTAR de referencia, acorde a lo siguiente:

$$\text{Costo PTAR "n"} = \text{Costo PTAR de referencia} * ((\text{Tamaño PTAR "n"} / \text{Tamaño PTAR referencia})^{0.70})$$

La capacidad de la PTAR de referencia es para un caudal promedio de 150 L/s.

A manera de ejemplo, al utilizar la ecuación anterior, y considerando que la PTAR "n" es de 350 L/s de capacidad, se obtiene un multiplicador de 1.81, mismo que se aplica sobre el importe de las unidades de proceso de la PTAR de referencia.

De esta forma, en lugar de ajustar el costo de la PTAR "n" con una relación lineal entre el tamaño de ambas plantas (2.33), el criterio toma en cuenta que el costo unitario de inversión (\$ por L/s de capacidad) disminuye al aumentar el tamaño de la unidad de proceso y/o de la PTAR.

Este procedimiento de ajuste de costo se utilizó en las unidades de proceso cuyo dimensionamiento está determinado por la capacidad y carga hidráulica, como es el caso de las etapas que a continuación se indican:

- Pretratamiento (cribado y desarenación)
- Regulación y/o bombeo de agua cruda/pretratada
- Sedimentación primaria
- Caja distribuidora agua primaria
- Clarificación secundaria
- Recirculación y purga de lodo
- Filtración terciaria
- Desinfección
- Tanque de lodo digerido

Asimismo, el procedimiento de ajuste de costo descrito en este numeral también es aplicable en los procesos biológicos de tratamiento de agua y en las operaciones y procesos del tren de tratamiento de lodos, cuando en la PTAR "n" se presenta la condición de carga influente orgánica y de sólidos que se describe en el siguiente numeral.

3. El factor de ponderación arriba referido se utiliza de manera directa si la carga contaminante influente a la PTAR "n", expresada como la concentración promedio de la DBO y SST en el agua residual cruda, es comparable a la de ($\leq 20\%$) la PTAR de referencia.

La concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente a la PTAR de referencia es 350 mg/L.

Se considera que el agua residual influente a la PTAR "n" es comparable al agua residual de la PTAR de referencia, cuando la concentración promedio de DBO y SST está en el rango de $\pm 20\%$ a la concentración indicada en el párrafo previo.

4. A continuación se enlistan las operaciones y procesos del tren de tratamiento de agua y de lodos que, en caso de variación mayor al 20 % en la concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente, estarían sujetos a ajuste de costo adicional al ya aplicado en el numeral 3.
 - Filtro rociador
 - Reactor de lodos activados, remoción DBO
 - Reactor de lodos activados, remoción de fosforo
 - Reactor de lodos activados, remoción nitrógeno
 - Espesado de lodo
 - Digestión aerobia
 - Digestión anaerobia
 - Desaguado de lodo

En los casos en que la calidad del agua residual influente a la PTAR "n" tiene una variación superior al 20%, hacia arriba o hacia abajo, se procedió a aplicar un ajuste adicional al costo de inversión en las operaciones y procesos del listado inmediato previo.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual influente es $\approx 30\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.05 o 0.90, según corresponda.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual es $\approx 40\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.12 o 0.80, según corresponda.

5. Se aplicó un factor de ponderación para los casos en que la actividad propuesta no es una unidad de proceso nueva y completa, es decir que consiste en la rehabilitación, mejoramiento o complemento de capacidad de una etapa de proceso o unidad existente.

El valor del factor de ponderación asignado en estos casos está en el rango de 0.35 a 0.65, a criterio del especialista, en función del grado de intervención que se requiere para la unidad de proceso en cuestión.

En términos generales, los valores cercanos al límite inferior del rango se aplicaron cuando la acción implicaba rehabilitación civil única o principalmente; los valores cercanos al límite superior se aplicaron cuando la intervención implica también reequipamiento electromecánico.

6. Una vez establecido el importe de inversión por planta de las principales unidades del tren de tratamiento de agua y de lodos, para determinar el importe de otros componentes de la PTAR a dicho importe se aplicó un valor seleccionado de los rangos de porcentaje que a continuación se indican:

Equipo menor:	5 % a 8 %
Vialidades, patios y obras exteriores:	1 % a 5 %
Obra eléctrica:	10 % a 15 %
Automatización y control:	3 % a 5 %
Imprevistos y contingencias:	8 % a 12 %

7. El importe por elaboración del proyecto ejecutivo de las acciones propuestas por planta se determinó a partir de un porcentaje, en el rango del 1.2 % al 3.5 %, mismo que se aplicó sobre el importe total estimado.

8. El costo de la supervisión de la ejecución y puesta en marcha de las obras y equipamiento propuestas en el Plan de Acciones por planta, se estableció aplicando un porcentaje del 3.5 % sobre el importe total estimado, sin incluir los importes correspondientes al costo del proyecto ejecutivo y de capacitación.

Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares

La selección de la digestión anaerobia como proceso de tratamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, orientado a la generación de biogás para su aprovechamiento, o bien la opción de instalar paneles solares en estas plantas, ha sido justificada mediante criterios técnicos específicos. Estos criterios incluyen la capacidad operativa de las plantas, la disponibilidad de espacio físico y las propiedades de la carga orgánica influente. En particular, en el caso de las PTAR ubicadas en el Estado de Quintana Roo, el contexto local en que se encuentra cada planta cobra especial relevancia, dado que las condiciones geográficas, ambientales y de infraestructura turística pueden influir en la viabilidad y eficiencia de cada tecnología implementada.

Este análisis permite una decisión fundamentada, buscando optimizar tanto el rendimiento energético como el aprovechamiento sostenible de los recursos locales.

Antecedentes

Como parte del diagnóstico para el mejoramiento de las PTAR de Quintana Roo mayores a 100 L/s, la digestión anaerobia se considera en las siguientes PTAR:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur que recibe también los lodos de la PTAR Caribe
4. PTAR Saas Tun Ha (a futuro, mediano plazo)

Adicionalmente, la instalación de paneles solares se considera en las siguientes PTAR, de las cuales las primeras tres son instalaciones existentes:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur
4. PTAR El Rey
5. PTAR Saas Tun Ha
6. PTAR San Miguelito
7. PTAR Bicentenario
8. PTAR Centenario

Digestión Anaerobia y Cogeneración

La digestión anaerobia es un proceso biológico mediante el cual los lodos residuales se descomponen en ausencia de oxígeno, generando biogás. El biogás, compuesto principalmente de metano, puede ser aprovechado para producir electricidad y calor mediante sistemas de cogeneración. Además de reducir el volumen de lodos, la digestión anaerobia permite un manejo más eficiente de los residuos, mejorando la sostenibilidad de las plantas al aprovechar el potencial energético del metano.

Los principales aspectos considerados para proponer digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás en las PTAR se presentan en seguida. Todos fueron considerados en conjunto para cada planta.

Condiciones climáticas

La temperatura está relacionada con la velocidad de las reacciones químicas. En el diseño de la digestión anaerobia, la temperatura aumenta la velocidad de hidrólisis y de formación de metano, además disminuye el mínimo tiempo de retención requerido para llegar a una destrucción de sólidos aceptable (38 % en SSV).

Para un proceso mesofílico, que es el seleccionado para las PTAR de Quintana Roo, las temperaturas óptimas se encuentran entre los 30 y 38°C (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014), lo cual es fácilmente alcanzado en la región, con temperaturas de agua residual alrededor de los 30°C todo el año. El no requerir un sistema para control fino de la temperatura es una gran ventaja de toda la zona.

Carga orgánica influente

Se requiere mantener cierta carga orgánica para mantener el equilibrio entre los microorganismos que realizan la digestión anaerobia y mantener una producción de biogás constante. La carga orgánica alimentada al digestor proviene de la fracción de SSV en los lodos generados en el proceso primario y/o secundario y éstos a su vez dependen de las características del agua residual.

En general, la carga orgánica influente necesaria proviene de un análisis detallado del proceso para cada caso, sin embargo, existen lineamientos con reglas generales para anticipar este resultado. En el caso de las PTAR de Quintana Roo, se consideraron para digestión anaerobia las PTAR que en su operación actual o a capacidad plena, recibieran más de 300 L/s o carga orgánica igual o mayor a 7.5 ton DBO/d, esto de acuerdo con estudios técnicos realizados previamente por GI (GIZ, 2017) .

Toxicidad

La digestión anaerobia es un proceso sensible a variaciones de pH y puede verse afectada por la presencia de ciertas sustancias inhibitoras en las aguas residuales. Para la instalación de

una nueva PTAR, es fundamental realizar análisis previos para descartar la presencia de estos compuestos que puedan interferir en el proceso. En el presente caso, dado que las PTAR evaluadas ya están en operación, se ha verificado que en los sitios propuestos para la digestión anaerobia no se han registrado historiales de inhibiciones significativas al proceso biológico, lo que garantiza su viabilidad.

Volumen y tipo de lodos generados

Una de las principales ventajas de la digestión anaerobia es la generación de biogás, siendo más eficiente esta generación cuanto mayor es la carga orgánica en los sólidos alimentados. En los sitios propuestos, además de lodos secundarios, se procesan lodos primarios con alto contenido de SSV, lo que incrementa la generación de biogás. Las altas cargas orgánicas influentes a las plantas aseguran buena generación de sólidos, maximizando la eficiencia del sistema de digestión.

Disponibilidad de espacio

Los sitios con propuesta de digestión anaerobia fueron revisados para la disponibilidad de espacio para una unidad de digestión anaerobia junto con gasómetro e instalaciones de cogeneración y manejo de biogás.

Disponibilidad operativa

La digestión anaerobia es una unidad significativamente más compleja que las demás en el tren de tratamiento, lo que demanda mayor capacidad técnica y un personal operativo especializado para su correcta operación a lo largo de la vida útil de la PTAR. En las plantas propuestas, se considera que cuentan con el personal y la capacidad técnica necesarios para implementar y mantener este proceso de manera eficiente.

Viabilidad operativa

Con base en la calidad de agua, la temperatura, el caudal influente y el tipo de proceso, es posible estimar la cantidad de lodos producidos en cada PTAR. Los lodos producidos son la base para estimar el tamaño ideal del digestor anaerobio. De acuerdo con la literatura (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014) el tiempo de retención recomendado para los lodos a 30°C es de 6 a 14 días y la carga orgánica puede variar entre los 1.6 y 4.8 kg SSV/m³ d.

A manera de ejemplo, con el volumen de 5,700 m³/d y a una carga de 2.4 kg SSV/ m³ d sería posible alimentar hasta 13.7 toneladas al día de lodo. Este flujo másico a una concentración de 3.5 % en sólidos tendría un tiempo de residencia de 14.6 días. La producción de lodo actual de las PTAR seleccionadas para digestión anaerobia varía entre 6.7 y 9.9 toneladas al día, y puede ser aún mayor de acuerdo con la capacidad de tratamiento de agua residual instalada. El volumen seleccionado considera este crecimiento además de las necesidades actuales.

Conclusiones para biogás y cogeneración

Los aspectos anteriores se analizaron y forman parte del análisis de costo presentado. En general en las PTAR seleccionadas es positiva la presencia de la digestión anaerobia. En resumen, para seleccionar las PTAR donde es viable instalar digestión anaerobia se consideró que:

1. La temperatura de la zona es favorable con 30°C.
2. La carga orgánica influente a las PTAR y/o el caudal se encuentran en el umbral de 7.5 ton/d de DBO o 300 L/s de caudal tratado.
3. Los procesos biológicos existentes no presentan obstáculos por sustancias inhibidoras.
4. La presencia de lodo primario favorece la producción de biogás.
5. Existe suficiente espacio para la instalación de las unidades respectivas.
6. Existe suficiente personal operativo y capacidad técnica para mantener la unidad funcionando eficientemente.
7. El volumen seleccionado como base para los costos cubre los rangos de operación actuales y futuros de cada PTAR.
8. En el balance económico, la producción y aprovechamiento del biogás es un instrumento importante para hacer viable la operación de las PTAR más grandes.

Generación de Energía Solar

A diferencia de la digestión anaerobia, la instalación de paneles solares es un proceso más sencillo y viable para prácticamente cualquier PTAR. El criterio principal para su implementación fue la disponibilidad de espacio en la planta y su tamaño, siendo seleccionadas aquellas de mediana o gran escala.

Las plantas que no tienen suficiente carga orgánica para justificar la digestión anaerobia, pero disponen de amplias áreas, pueden aprovechar los paneles solares para reducir su dependencia de la red eléctrica y generar energía renovable de manera sostenible. En consecuencia, esta tecnología se considera para casi todas las PTAR.

El costo de implementación de ambas tecnologías no es equivalente, siendo la digestión anaerobia considerablemente más costosa. Sin embargo, como se muestra en el análisis económico, la generación de biogás a escalas superiores al umbral establecido por la GIZ produce una cantidad significativa de energía eléctrica, generando importantes ahorros a largo plazo. Además, la digestión anaerobia requiere una mayor capacidad técnica para su operación. En contraste, los paneles solares, más sencillos de instalar y mantener, representan una opción accesible y conveniente para todas las PTAR.

A continuación se presenta una tabla resumen con los principales criterios utilizados para la selección de digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás, así como para la instalación de paneles solares.

			Principales Criterios para selección de Digestión Anaerobia					Criterio de selección para la instalación de Paneles Solares	
Nombre de la planta	Capacidad instalada (L/s)	DBO entrada (mg/L)	Carga orgánica influente (Ton DBO /día)	Carga orgánica > 7.5 ton / día	Sedimentación primaria (Lodo primario)	Disponibilidad operativa	Digestión Anaerobia	Espacio disponible	Paneles solares
Playcar	150	501	6.5	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Resumen de inversión, techo financiero

En la Tabla 15 se muestra el monto de inversión por unidad de proceso o componente de proyecto, y en la Figura 15 se muestra su distribución porcentual.

Tabla 15:
Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Etapa o componente	Importe PTAR Playacar, mdp's
Proyecto ejecutivo	0.80
Bombeo / regulación / pretratamiento / primario	11.18
Remoción DBO y nutrientes, desinfección	5.86
Tratamiento terciario	6.46
Tren de tratamiento de lodos	3.25
Digestión anaerobia	
Cogeneración	
Paneles solares	
Equipo menor	1.34
Terracerías, vialidades, patios	0.27
Obra eléctrica	3.21
Automatización y control	1.07
Imprevistos y contingencias	2.14
Supervisión	1.23

Etapa o componente	Importe PTAR Playacar, mdp's
Capacitación	0.40
Total	37.22

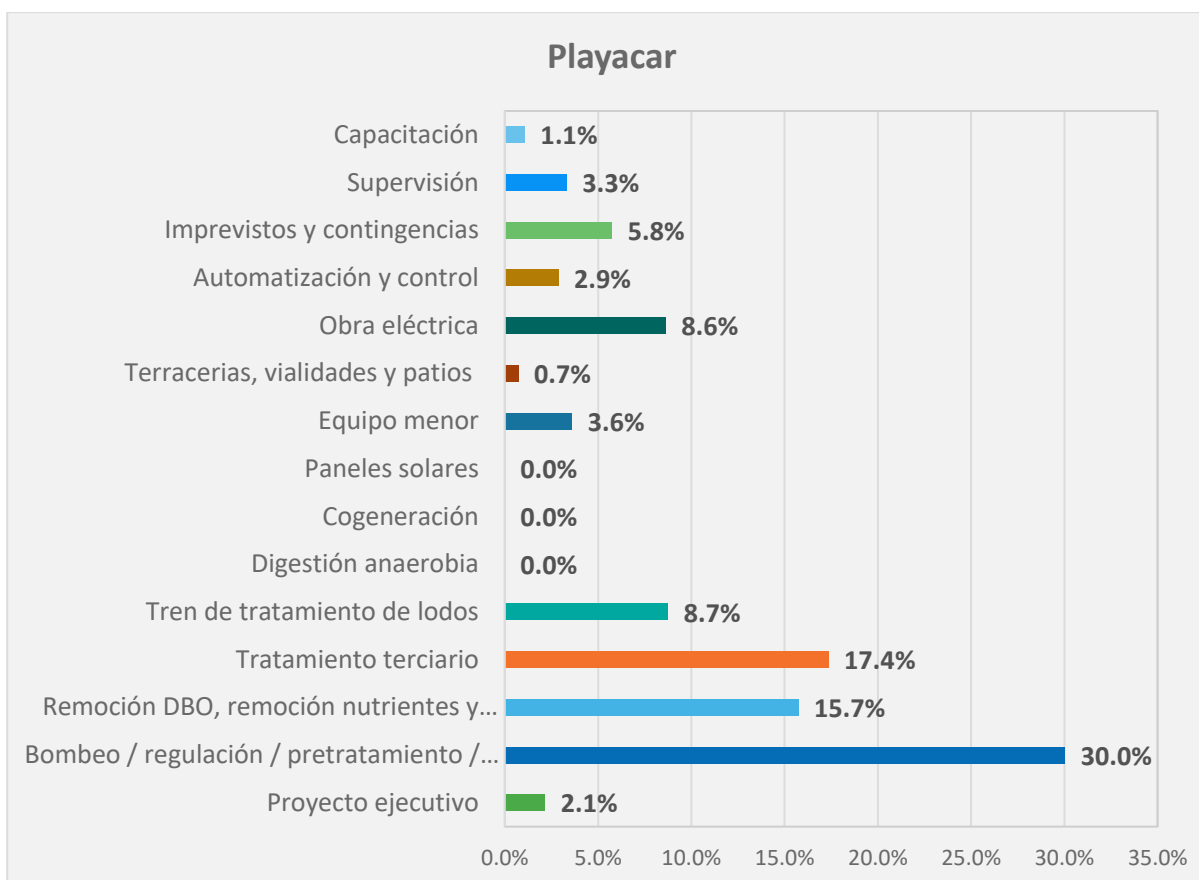


Figura 15 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

En la Tabla 16 se muestra el resumen del techo financiero total.

Tabla 16:
Monto de inversión, millones de pesos

PTAR	Capacidad instalada, L/s	Capacidad propuesta, L/s	Inversión requerida	Inversión Digestión Anaerobia	Inversión Cogeneración	Inversión Paneles solares	Inversión Total	Inversión unitaria, k\$/lps
Playacar	150	90	37.2	--	--	--	37.2	413

A continuación, se muestra la estimación detallada de costos, se describe la unidad de proceso, el factor de ajuste integrado y monto de inversión estimado, así como los porcentajes aplicados a las obras complementarias: vialidades, obra eléctrica, de control e instrumentación, imprevistos, proyecto ejecutivo, supervisión y capacitación.

Tabla 17:
Estimación detallada de costos PTAR Playacar

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tren de Tratamiento de Agua		
Pretratamiento mecánico	0.53	11.18
Regulación agua cruda/pretratada		
Sedimentación primaria		
Caja distribuidora agua primaria		
Filtro biológico		
Biológico remoción DBO		
Biológica remoción de fósforo		
Biológico remoción nitrógeno	0.53	3.06
Clarificación secundaria		
Recirculación y purga de lodo		
Filtración terciaria	0.53	6.46
Desinfección	0.27	2.80
Pozos de infiltración		
Tren de Tratamiento de Lodos		
Espesado		
Digestión aerobia		
Digestión anaerobia		
Tanque de lodo digerido		
Desagüado	0.19	3.25

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Cogeneración		
Subtotal		26.76
Equipo menor	5.0%	1.34
Terracerías, vialidades y patios	1.0%	0.27
Obra eléctrica	12.0%	3.21
Automatización y control	4.0%	1.07
Imprevistos y contingencias	8.0%	2.14
Proyecto ejecutivo		0.80
Supervisión		1.23
Capacitación		0.40
Total		37.22

Three wavy lines in green, blue, and grey are positioned at the top left of the page, above the main title.

4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Este programa de inversiones es el resultado de las acciones propuestas para mejorar la calidad del agua tratada de las PTAR con capacidad de tratamiento igual o mayor a 100 l/s en el estado de Quintana Roo, así como el presupuesto derivado del plan de acciones. La programación de las inversiones se basa en las necesidades propias de cada planta considerando el objetivo principal, que es el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

El 5 de diciembre de 2022 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación los:

LINEAMIENTOS que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Los Lineamientos constan en total de veintitrés artículos, más un artículo transitorio, así como el denominado Anexo A: Instructivo para la Información Requerida en el Sistema.

Los Lineamientos están estructurados en seis capítulos:

- + Capítulo Primero, Disposiciones Generales
- + Capítulo Segundo, Requisitos para la Presentación y Registro de los Programas para

- el Cumplimiento
- + Capítulo Tercero, De los Plazos de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Cuarto, Procedimiento para la presentación, registro y revisión de los Programas para el Cumplimiento, así como del Informe de Avances
- + Capítulo Quinto, De las Verificaciones
- + Capítulo Sexto, De las Sanciones

Aspectos Clave de los Lineamientos

Artículo 2. Sujeto Regulado: El responsable de descargas de aguas residuales al que resulte aplicable la NOM-001-SEMARNAT-2021, quien podrá presentar sus Programas para el Cumplimiento ante la Comisión.

Artículo 5. La presentación del Programa para el Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, **es de naturaleza voluntaria**, por lo que, en caso de su incumplimiento, el responsable de la descarga de aguas residuales en cualquier cuerpo receptor propiedad de la nación, quedará sujeto a los plazos establecidos en la mencionada Norma Oficial Mexicana

Artículo 6. El Sujeto Regulado presentará su Programa para el Cumplimiento, en los siguientes supuestos:

- a) Cuando **deba modificar sus instalaciones** con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como el Apéndice Normativo de la NOM-001-SEMARNAT-2021, y que los ajustes y acciones que se deban ejecutar de acuerdo a los estudios realizados por dicho Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor, en el Artículo 2o Transitorio de la NOM, o bien,
- b) Que el Sujeto Regulado **deba modificar los procesos productivos de las actividades que generan la descarga de aguas residuales**, con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como al Apéndice Normativo y que dichas modificaciones, de acuerdo con los análisis o la evidencia del Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor.

Artículo 7. El Sujeto Regulado, en caso de presentar el Programa para el Cumplimiento lo hará por cada uno de los puntos autorizados en su Permiso de Descarga, y que, para cumplir con las disposiciones establecidas en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se ubiquen en alguno de los supuestos establecidos en el Artículo 6 de los Lineamientos.

Artículo 8. Una vez registrado el Programa para el Cumplimiento, y en tanto este se encuentre

vigente, en concordancia con el Artículo 5º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, el Sujeto Regulado deberá cumplir, además de lo comprometido en el Programa, con los límites y parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, para gozar de los beneficios e incentivos que para tales efectos establezca la LFD vigente.

Artículo 10. El Programa para el Cumplimiento, contendrá:

- + Nombre, denominación o razón social del Sujeto Regulado;
- + RFC del Sujeto Regulado;
- + Datos de identificación del Permiso de Descarga; Volumen de descarga; Datos del medidor o dispositivo de medición de las aguas residuales descargadas; Coordenadas del punto de descarga;
- + Datos generales del representante legal; Correo electrónico;
- + Justificación de la solicitud para la aplicación del Programa para el Cumplimiento;
- + Cronograma de actividades para las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento; Periodo solicitado;
- + E-Firma del Sujeto Regulado o representante legal.

Artículo 12. Los Programas para el Cumplimiento deberán presentarse ante la CONAGUA, por el Sujeto Regulado **a partir de que entre en vigor la NOM-001-SEMARNAT-2021 y hasta el 3 de abril del 2023.**

El Sujeto Regulado que no presente su Programa para el Cumplimiento en el periodo señalado, se sujetará a los plazos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 13. Los plazos que se establezcan en el Cronograma de Actividades para el seguimiento de las acciones comprometidas en los Programas para el Cumplimiento **no deberán rebasar el 11 de marzo de 2027.**

Artículo 15. La CONAGUA realizará revisiones aleatorias a los Programas para el Cumplimiento, podrá solicitar al Sujeto Regulado, las aclaraciones o información adicional que considere necesarias. En el supuesto de que el Sujeto Regulado no atienda el requerimiento de información dentro de los veinte días hábiles siguientes, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y será aplicable lo establecido en el Artículo 2º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 16. Una vez registrado el Programa ante la CONAGUA, no será objeto de modificación, salvo en el caso que el Sujeto Regulado justifique la necesidad de realizar algún cambio y no exceda el plazo originalmente establecido.

Artículo 17. El Sujeto Regulado debe presentar **dentro de los primeros cinco días hábiles de los meses de marzo y septiembre de cada año**, a partir de la fecha del registro, el avance de actividades mediante la carga de información que solicite el Sistema de Gestión en el apartado correspondiente al Informe de Avance del Programa para el Cumplimiento. Cuando el Sujeto

Regulado no envíe en tiempo y forma la información del Informe de Avance, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y se aplicarán las disposiciones de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 21. La CONAGUA procederá a cancelar el Programa para el Cumplimiento y su registro, cuando compruebe que el Sujeto Regulado no ha cumplido con lo comprometido en el programa registrado. La CONAGUA, procederá a notificar la cancelación del Programa, por lo que quedarán sin efectos las acciones de cumplimiento propuestas por el Sujeto Regulado en su respectivo Programa, aplicándose las disposiciones correspondientes de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 22. Cuando las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento presentado impliquen la suspensión de sus procesos productivos y actividades para llevar a cabo las acciones tendientes a la conversión de procesos productivos o la instalación de maquinaria, equipos o plantas que se requieran para el cumplimiento de los parámetros y límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, y deba quedar fuera de operación el sistema de tratamiento de aguas residuales, el Sujeto Regulado deberá dar aviso a la CONAGUA, al menos 30 días hábiles antes de que esto ocurra, e indicar el periodo por el que prevalecerá dicha situación, el cual **no deberá exceder de tres meses**, y podrá presentarse **hasta un máximo de dos ocasiones** durante la vigencia del Programa.

De llevar a cabo la suspensión de sus procesos de tratamiento de aguas residuales sin el aviso correspondiente se aplicarán las sanciones previstas. Una vez recibida la solicitud, el Sistema de Gestión emitirá el comprobante que acreditará que la solicitud fue hecha en tiempo y forma.

Artículo 23. En caso de incumplimiento a los compromisos establecidos en el Programa para el Cumplimiento, quedan sin efecto las prerrogativas que ampara dicho documento, por lo cual el Sujeto Regulado será acreedor a las sanciones que correspondan y, en su caso, estará obligado a efectuar el pago de los derechos por el uso y aprovechamiento de cuerpos receptores de descargas de aguas residuales propiedad de la nación, a partir de la fecha del incumplimiento, así como de aquéllos que se hubieren generado con anterioridad, con sus accesorios, conforme a la LFD vigente.

Programa de inversión anual

Como se mencionó anteriormente, el monto de inversión total del Plan de Acciones es de 37.22 millones de pesos (mdp), inversión a realizarse en 5 años a partir del año 2023 hasta marzo del 2027, acorde al plazo previsto en los Lineamiento que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el presente apartado se muestra el desglose anual del Plan de Acciones, donde se describe el monto de inversión por año y unidad de proceso y/o componente del proyecto programado, así como los importes anuales y acumulados y su porcentaje de participación en la inversión.

Tabla 18:
Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
A	Proyecto ejecutivo	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80
		100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
B	Cárcamo, regulación, pretratamiento, y/o tratamiento primario	0.00	11.18	0.00	0.00	0.00	11.18
		0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
C	Tren de tratamiento de agua	5.86	0.00	0.00	0.00	0.00	5.86
		100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
D	Tratamiento terciario	0.00	6.46	0.00	0.00	0.00	6.46
		0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
E	Tren de tratamiento de lodos	3.25	0.00	0.00	0.00	0.00	3.25
		100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
F	Cogeneración (y/o paneles	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
	solares)	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
G	Equipo menor	0.48	0.86	0.00	0.00	0.00	1.34
		36.0%	64.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
H	Terracerías, vialidades y patios	0.10	0.17	0.00	0.00	0.00	0.27
		36.0%	64.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
I	Obra eléctrica	1.16	2.06	0.00	0.00	0.00	3.21
		36.0%	64.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
J	Automatización	0.39	0.69	0.00	0.00	0.00	1.07
		36.0%	64.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
K	Imprevistos y contingencias	0.77	1.37	0.00	0.00	0.00	2.14
		36.0%	64.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	Total Anual y Gran total, mdp's	13.45	23.77	0.00	0.00	0.00	37.22
	Acumulado anual, mdp's	13.45	37.22	37.22	37.22	37.22	
	Total Anual y Gran total, %	36.1%	63.9%	0.0%	0.0%	0.0%	100%
	Acumulado anual, %	36.1%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	

A continuación, se muestra de manera gráfica el monto de inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR:

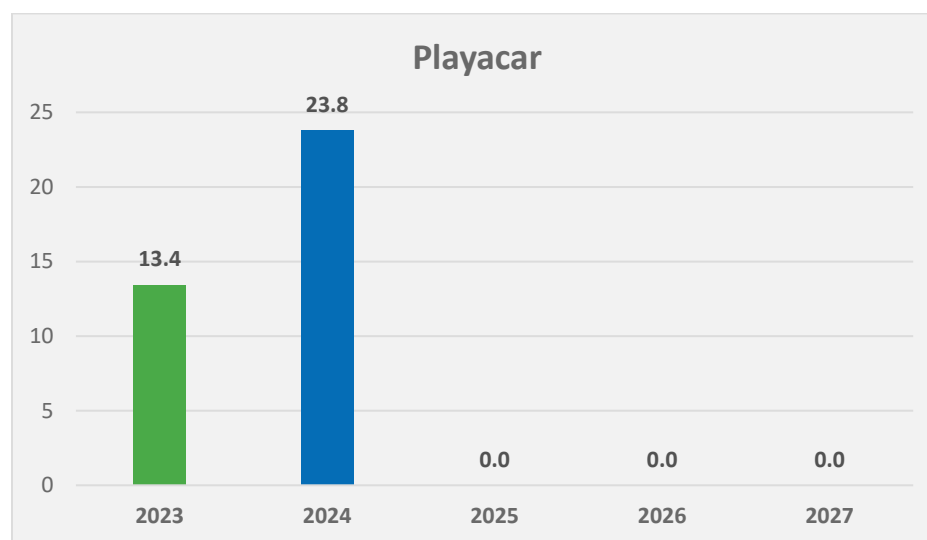


Figura 16 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Bibliografía

CONAGUA. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. . México: CONAGUA.

GIZ, C. A. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Mexico: GIZ.

Metcalf & Eddy / AECOM. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. NY: McGraw-Hill.

Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4a ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.

US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Pok Ta Pok

Contenido

PTAR Pok Ta Pok	1
Contenido	4
Índice de Tablas	5
Índice de Figuras	6
1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más	8
Descripción general de la PTAR Pok Ta Pok	8
Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases	9
Descripción general del proceso	9
Diagrama de flujo de proceso	11
Descripción de las unidades de proceso	12
Tren de Tratamiento de Agua	12
Tren de Tratamiento de Lodos	21
Estado de conservación y operación de las instalaciones.....	27
Análisis de calidad del agua cruda.....	29
Calidad de agua cruda, histórica	29
Calidad de agua cruda, de este Estudio	30
Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada.....	33
Calidad de agua tratada, histórica.....	33
Calidad de agua tratada, de este Estudio.....	34
Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua	37
Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que	

conduce las aguas residuales a la PTAR	38
Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) reportados por el Organismo Operador	38
Estimación de los costos de operación y mantenimiento	39
Observaciones y recomendaciones generales	44
2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	46
3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	52
Techo financiero	52
Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales	54
Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares	58
Resumen de inversión, techo financiero.....	62
4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	66
Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	66
Aspectos Clave de los Lineamientos	67
Programa de inversión anual	70
Bibliografía.....	73

Índice de Tablas

Tabla 1: Dimensiones Reactores de Lodos Activados PTAR Pok Ta Pok	13
Tabla 2: Dimensiones Clarificadores Secundarios PTAR Pok Ta Pok.....	13
Tabla 3: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua.....	20
Tabla 4: Dimensiones de Digestor PTAR Pok Ta Pok.....	22
Tabla 5: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo	24

Tabla 6: Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)	30
Tabla 7: Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente	32
Tabla 8: Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)	33
Tabla 9: Caracterización del agua tratada de este Estudio (<i>E.coli</i> y Huevos de helminto)	36
Tabla 10: Cumplimiento del agua tratada	36
Tabla 11: Ubicación de pozos de infiltración PTAR Pok Ta Pok	37
Tabla 12: Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales	40
Tabla 13: Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M	42
Tabla 14: Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Pok Ta Pok	47
Tabla 15: Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Pok Ta Pok	48
Tabla 16: Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio	53
Tabla 17: Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	62
Tabla 18: Monto de inversión, millones de pesos	64
Tabla 19: Estimación detallada de costos PTAR Sur	64
Tabla 20: Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado	70

Índice de Figuras

Figura 1 Vista Aérea PTAR Pok Ta Pok	8
Figura 2 Diagrama de Flujo de Proceso Actual PTAR Pok Ta Pok	11
Figura 3 Arreglo General de Unidades de la PTAR Pok Ta Pok	15
Figura 4 Cárcamo de Bombeo de Agua Cruda y Canales de Desarenación	15
Figura 5 Vertedores en Desarenación Horizontal y Cribado Manual	16
Figura 6 Canal Parshall y Caja Distribuidora de Agua Cruda	16
Figura 7 Reactor de Lodos Activados Tipo I	17
Figura 8 Clarificador Secundario Tipo I	17

Figura 9 Reactor de Lodos Activados Tipo II.....	17
Figura 10 Clarificador Secundario Tipo II.....	18
Figura 11 Tanque de Contacto de Cloro Tapado, Rejillas de Retención de Natas	18
Figura 12 Tanques de Gas Cloro y Dosificador, Instalados a la Intemperie	18
Figura 13 Pozo de infiltración de agua tratada, y Bombas de Agua de Servicios	19
Figura 14 Vista General Soplador Centrífugo y Bombas de Recirculación de Lodos	19
Figura 15 Digestor aerobio de lodos	23
Figura 16 Caseta de Desaguado de Lodo, Preparador de Polímero y Filtro Banda en Operación de Desaguado	23
Figura 17 Vista General Caseta de Desaguado de Lodo y Tolva de Lodos.	23
Figura 18 Caracterización del agua cruda (sep-2022)	31
Figura 19 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021).....	34
Figura 20 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT).....	35
Figura 21 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)	35
Figura 22 Pozos de infiltración PTAR Pok Ta Pok	38
Figura 23 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m ³	43
Figura 24 Vista actual de la PTAR Pok Ta Pok.....	46
Figura 25 Diagrama de flujo de la PTAR Pok Ta Pok con las acciones propuestas.....	51
Figura 26 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	63
Figura 27 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	72

1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más

Descripción general de la PTAR Pok Ta Pok

La PTAR Pok Ta Pok se localiza en la Zona Hotelera de Cancún y proporciona el servicio de tratamiento al agua residual de origen municipal y de los usos comercial, servicios y hotelero generadas en su zona de servicio, que corresponde a la franja norte de la zona hotelera. FONATUR es responsable de la operación y mantenimiento de la PTAR, así como del fondeo y/o obtención de los recursos económicos requeridos para su ampliación, modernización, rehabilitación y sustitución de equipos. En la Figura 1 se presenta la vista general satelital de la PTAR Pok Ta Pok.



Figura 1 Vista Aérea PTAR Pok Ta Pok

Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases

La PTAR Pok Ta Pok se construyó en el año 1972 y tiene capacidad nominal para tratar un caudal promedio de 245 L/s. De acuerdo con la información de FONATUR, el caudal promedio tratado en el año 2021 fue de 200 L/s, aunque en ocasiones se presentan picos de caudal mayores a 300 L/s. Las operaciones que conforman el proceso de tratamiento de agua y lodos se enlistan a continuación; entre paréntesis se indican el número de unidades por proceso:

Tren de tratamiento de agua:

- + Cárcamo final (1)
- + Pretratamiento manual: cribado (2), desarenado horizontal (4), canal Parshall (1)
- + Reactor de lodos activados aireación difusa (5)
- + Clarificación secundaria (5)
- + Desinfección con gas cloro, tanque de contacto de cloro (1)
- + Cisterna y bombeo de agua tratada para reúso (6)
- + Pozos de infiltración de agua tratada (10)

Tren de tratamiento de lodos:

- + Digestión aerobia, aireación mecánica (1)
- + Desaguado mecánico, en filtro banda (1)

El agua tratada producida en la PTAR se aprovecha parcialmente por FONATUR en el riego de las áreas verdes publicas situadas a lo largo del Bulevar Kukulcán, y cuenta también con la posibilidad de entregar agua al campo de golf del mismo nombre. El agua tratada excedente se dispone en el subsuelo mediante pozos de infiltración.

Descripción general del proceso

El agua residual de la PTAR ingresa al cárcamo de bombeo de agua cruda, desde este punto el agua es enviada hacia el pretratamiento. La operación del cárcamo de bombeo es ajena a FONATUR, por lo que el ingreso de los picos de agua requiere una labor operacional intensiva para asegurar que todo el caudal ingrese a la PTAR.

En el tren de agua, después del pretratamiento, el agua ingresa a una caja de distribución desde donde pasa al proceso de lodos activados. Este está repartido en cinco reactores con su correspondiente clarificador secundario, aunque no todos son del mismo tamaño. Existen dos grupos de reactores con distinto tamaño; el primer grupo con tres reactores del lado este de la planta y el segundo grupo con dos reactores en la parte sur de la planta, los reactores de

la zona sur son más pequeños que los de la zona este.

El agua clarificada efluente de cada clarificador secundario se dirige hacia el tanque de contacto de cloro, donde se junta y se dosifica cloro gas para lograr la desinfección. Posteriormente, el agua ingresa a alguna de las seis cisternas de agua tratada conectadas en serie de donde parte hacia alguno de los destinos de reuso. El agua no utilizada es conducida hacia alguno de los pozos de infiltración.

Respecto al tren de lodos, la purga de lodo secundaria es enviada hacia el digestor aerobio. Aunque no se cuenta con una operación específica de espesamiento, el lodo se espesa dentro del digestor aerobio por paros programados de la aireación y decantación. El agua recuperada de la decantación es retornada al proceso para su tratamiento.

El lodo digerido es enviado a desaguado en filtro banda y posteriormente se trasporta en camiones hacia la estación central de composteo de FONATUR junto con los residuos orgánicos de las áreas verdes comunes de la zona hotelera.

Diagrama de flujo de proceso

Para facilitar la comprensión de los procesos de tratamiento, más adelante, en la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo simplificado del proceso actual de tratamiento de agua y lodos.

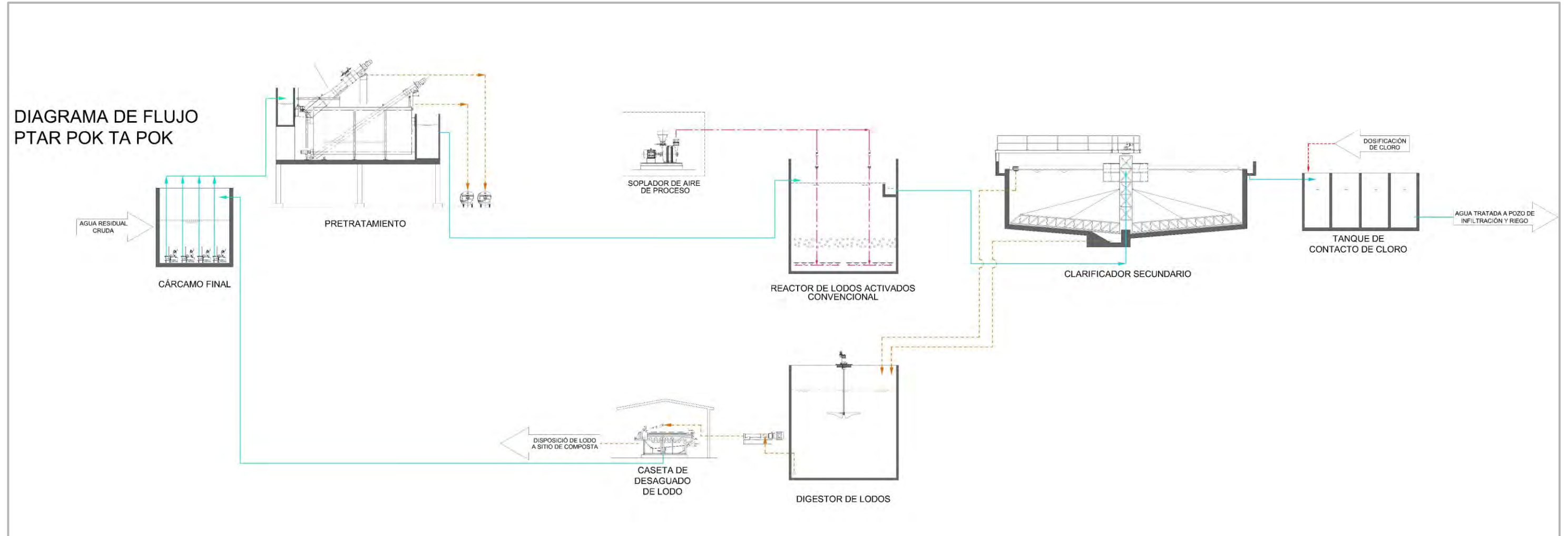


Figura 2 Diagrama de Flujo de Proceso Actual PTAR Pok Ta Pok

Descripción de las unidades de proceso

Como parte del trabajo de campo elaborado en este Estudio, se recopiló información sobre las características, dimensiones y condiciones de operación y mantenimiento de las unidades de proceso de la PTAR.

Tren de Tratamiento de Agua

Cárcamo final

El cárcamo de bombeo (Figura 4) se encuentra dentro de la PTAR y cuenta con dos bombas sumergibles y cuatro bombas centrífugas verticales. Las bombas verticales cuentan con mayor capacidad que las sumergibles, y son las que operan normalmente. El cárcamo es operado solamente por Aguakan, por lo que la cantidad de agua influente queda fuera del control de FONATUR en esta PTAR.

Pretratamiento

El agua bombeada por el cárcamo de bombeo ingresa al pretratamiento elevado. La plataforma se conforma de 4 etapas: canales de desarenación horizontal, cribado grueso y fino manual, canal Parshall de medición hasta 320 L/s, caja de distribución.

En toda la plataforma se observa óxido en los elementos metálicos en contacto con el agua. El deterioro es más crítico en los vertedores de los canales desarenadores (Figura 5) y en las compuertas de la caja de distribución (Figura 6). En el caso del desarenador, el deterioro de los vertedores disminuye la eficiencia de retención de arenas en el canal, al no formarse un flujo laminar. Mientras que en las compuertas el control de agua a cada tren presenta obstáculos por el deterioro de la compuerta.

El cribado manual y el canal Parshall funcionan correctamente, aunque, acorde con los comentarios del personal de operación, no se tiene capacidad suficiente para registrar los picos de caudal. El valor máximo de medición en el Parshall es de 320 L/s, a partir del cual deja de aumentar el registro del medidor, de manera que, en ocasiones, el caudal influente es mayor a este valor.

Reactores de lodos activados

A diferencia de las otras dos PTAR de FONATUR, la PTAR Pok Ta Pok no cuenta con sedimentación primaria, por lo que después del pretratamiento el agua ingresa directamente a los reactores de lodos activados. Ambos reactores se alimentan con aire difuso, con la diferencia que los reactores al este de la PTAR (Figura 7) son de tipo mezcla completa, mientras los ubicados al sur del predio (Figura 9) cuentan con mamparas divisorias para asemejarlos más a un flujo pistón. Las dimensiones de cada reactor diferente se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 1:
Dimensiones Reactores de Lodos Activados PTAR Pok Ta Pok

Concepto	Unidad	Valor Reactor Tipo I (Este)	Valor Reactor Tipo II (Sur)
Número de unidades	No.	3	2
Largo	m	26	24
Ancho	m	13.3	8
Tirante hidráulico	m	3.9	3.9
Volumen total	m ³	4,045	1,497

Un solo soplador satisface las demandas de aire de los cinco reactores, y se cuenta con uno de respaldo (Figura 14). El soplador se encuentra en buenas condiciones, es de tipo centrífugo y acorde con el personal de operación es de reciente cambio, por lo que no se han presentado problemas con su operación. Aunque inicialmente todos los reactores de lodos activados estaban habilitados para operar con aireación superficial, con el cambio a aireación difusa no se han presentado problemas de operación.

Clarificador secundario

El efluente de licor mezclado de cada reactor de lodos activados se alimenta a cada clarificador respectivamente según el tren donde se encuentre. En este año se sustituyeron las líneas de licor mezclado a los clarificadores 3, 4 y 5 ubicados al este de la planta. El retorno de lodos se realiza individualmente también, aunque existen algunos arreglos de tuberías para compartir el retorno de lodo de diferentes clarificadores a los reactores.

Los clarificadores ubicados al lado este de la PTAR son de puente fijo, mientras que los del lado sur son de puente móvil. Las dimensiones de ambos tipos de clarificadores se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2:
Dimensiones Clarificadores Secundarios PTAR Pok Ta Pok

Concepto	Unidad	Clarificador Tipo I (Este)	Clarificador Tipo II (Sur)
Diámetro	m	21.0	16.5

Concepto	Unidad	Clarificador Tipo I (Este)	Clarificador Tipo II (Sur)
Número de unidades	No.	3	2
Área	m ²	346.4	213.8
Tirante hidráulico, SWD	m	3.5	3.5

Desde los arreglos de retorno de lodos es posible ajustar las válvulas para purgar lodo hacia el digestor aerobio de lodos. Las natas secundarias recolectadas también se dirigen hacia el reactor de lodos activados. Algunas bombas de recirculación de lodo dentro del mismo grupo son de diferentes capacidades (Figura 14), esto debido a que se han reemplazado según su falla por bombas de otras plantas o ubicaciones.

Desinfección

El agua de cada clarificador se dirige hacia el tanque de contacto de cloro. A diferencia de las otras PTAR de FONATUR, sobre el tanque de contacto de cloro no se encuentra ninguna estructura, pero si se encuentra cubierto (Figura 11). Cuenta con sistema de generación de hipoclorito in situ, mismo que está fuera de operación desde hace varios años, debido a problemas en la calidad del agua de suministro y el tipo y calidad de la sal a utilizar. En su lugar se utiliza cloro gas, de los cuales la PTAR cuenta con 3 en stock.

Los tanques de cloro gas para la desinfección se encuentran colocados a un costado del pasillo de la zona de generación de hipoclorito in situ (Figura 12). La dosificación de cloro se realiza mediante un clorinador colocado directamente a la salida del tanque. Los tanques presentan algo de óxido en su exterior y no cuentan con grúa ni báscula. Aunque no se reportan obstáculos o problemas de operación en esta unidad, la instalación de los tanques de cloro en esta manera representa un riesgo de trabajo.

Disposición y aprovechamiento de agua tratada

El agua tratada se dirige hacia seis cisternas de agua tratada conectadas en serie. Cada cisterna cuenta con una batería de bombas diferente para satisfacer las necesidades de reúso o servicios dentro de la PTAR (Figura 13). El agua tratada es utilizada para regar la primera parte de la zona hotelera y además tiene posibilidad de entrega a la zona de Puerto Cancún y el campo de golf de Pok Ta Pok. De las cisternas, la que abastece al campo de golf de Pok Ta Pok no la ópera FONATUR, y depende de la demanda que necesite el campo.

Algunos de las baterías de bombas cuentan con filtro marca Amiad. El agua no utilizada pasa a alguno de los pozos de infiltración (Figura 13).

Vistas del tren de tratamiento de agua

De la Figura 3 a la Figura 22 se muestran las diferentes unidades del tren de agua de la PTAR.



Figura 3 Arreglo General de Unidades de la PTAR Pok Ta Pok



Figura 4 Cárcamo de Bombeo de Agua Cruda y Canales de Desarenación



Figura 5 Vertedores en Desarenación Horizontal y Cribado Manual



Figura 6 Canal Parshall y Caja Distribuidora de Agua Cruda



Figura 7 Reactor de Lodos Activados Tipo I



Figura 8 Clarificador Secundario Tipo I



Figura 9 Reactor de Lodos Activados Tipo II



Figura 10 Clarificador Secundario Tipo II



Figura 11 Tanque de Contacto de Cloro Tapado, Rejillas de Retención de Natas



Figura 12 Tanques de Gas Cloro y Dosificador, Instalados a la Intemperie



Figura 13 Pozo de infiltración de agua tratada, y Bombas de Agua de Servicios



Figura 14 Vista General Soplador Centrífugo y Bombas de Recirculación de Lodos

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua

Con el fin de verificar que las principales estructuras de proceso del tren de tratamiento de agua sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes en el agua cruda, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para tal efecto se utilizaron las dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior, los datos de caudal y calidad de agua cruda utilizados son los siguientes:

- + Caudal medio de diseño 245 L/s
- + Calidad de agua cruda promedio (histórico)
 - DBO, 100 mg/L
 - SST, 106 mg/L

En la Tabla 3 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de agua, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR El Pok Ta Pok con las dimensiones de las estructuras, en caso de no contar con algún dato de operación se asignó un valor promedio del rango típico.

Tabla 3:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Pok Ta Pok
Reactor de Lodos Activados			
Concentración de SSTLM	mg/L	3,000 - 4,000	3,000
Fracción volátil		0.7 a 0.8	0.75
Relación F/M	kg/kg - d	0.2 a 0.6	0.17
Carga volumétrica	KgDBO/m ³ - d	0.3 a 1.6	0.38
Tiempo hidráulico de retención total	horas	5 a 15	6.3
Tirante hidráulico	m	4.5 a 7.5	3.9
Clarificador Secundario			
Carga hidráulica superficial, Caudal medio	m ³ /m ² -d	16 a 28	14.4 (promedio entre todos los clarificadores)
Recirculación	%	25 a 100%	100%
Carga de sólidos, Caudal medio	Kg/m ² - h	4 a 6	3.6
Tirante hidráulico	m	4 a 5	4
Tanque de contacto de cloro			
Tiempo hidráulico de retención estimado	min	30	20.5

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + La concentración promedio de DBO influente a la PTAR Pok Ta Pok, así como a las otras PTAR de FONATUR, es relativamente baja. Es decir, el agua influente se encuentra significativamente diluida. Esto implica que las limitantes de proceso se deben a las condiciones hidráulicas más que a las cargas orgánicas.
- + Debido a la baja carga orgánica influente, el reactor de lodos activados, a pesar de no contar con sedimentación primaria, se encuentra sobrado para su capacidad actual. Esto al presentar una COV y F/M cercanos al rango inferior recomendado.
- + Entre los cinco clarificadores secundarios, se tiene suficiente capacidad para manejar el caudal influente a la PTAR y de diseño. El control del caudal alimentado a cada reactor, considerando que los reactores y clarificadores son de distinto tamaño, es importante para mantener una buena operación de la PTAR.
- + La PTAR no cuenta con la infraestructura suficiente para remover nitrógeno y dar cumplimiento a la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021. Aunque, como se verá más adelante, estos parámetros no aparentan ser un problema en esta zona, sin embargo, es importante realizar las adaptaciones correspondientes para garantizar el cumplimiento.

Tren de Tratamiento de Lodos

Digestor aerobio de lodos

Como se mencionó anteriormente, la purga de lodo secundario, efectuada con los equipos de recirculación de lodo, y las natas secundarias se dirigen hacia el digestor aerobio de lodos. El digestor cuenta con aireación de tipo superficial, y al igual que otras PTAR de FONATUR, el espesado de lodo se realiza dentro de la misma unidad mediante paros programados a la aireación y decantación del agua (Figura 15).

El lodo estabilizado se purga mediante una batería de tres bombas de tornillo y se dirige hacia el desaguado de lodo. Actualmente, solo se encuentran dos bombas de lodos digeridos, dado que la tercera se utilizó para suplir necesidades en otra ubicación. La instalación en general de puentes, agitadores presenta deterioro, aunque siguen en funcionamiento. En la Tabla 4 se presentan las dimensiones de esta unidad.

Tabla 4:
Dimensiones de Digestor PTAR Pok Ta Pok

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	1.0
Largo	m	25
Ancho	m	11
Tirante hidráulico	m	3.9
Volumen total	m ³	1,072

Desaguado de lodo

El desaguado de lodo digerido se efectúa con un filtro banda de 1.5 metros de ancho de banda, en funcionamiento durante la visita (Figura 16). Aunque el equipo funciona correctamente, se requiere su cambio por uno de mayor tamaño, dado que se encuentra cercano a su capacidad máxima. En promedio, y de acuerdo con el personal de operación, el equipo opera de 20 a 24 horas por día, los siete días de la semana.

Cuenta con un equipo de preparación de polímero similar al de las otras PTAR de FONATUR, que consiste en un tanque Rotoplas de 1,200 L con un agitador hechizo (Figura 16). La cantidad de polímero preparado varía según la producción de lodo, pero el personal de operación comenta que se preparan de dos a tres lotes diarios. El lodo digerido se almacena temporalmente en la tolva de lodos en espera del camión recolector de lodos (Figura 17).

Vistas del tren de tratamiento de lodo

De la Figura 4 a la Figura 22 se muestran las diferentes unidades del tren de lodo de la PTAR.



Figura 15 Digestor aerobio de lodos



Figura 16 Caseta de Desaguado de Lodo, Preparador de Polímero y Filtro Banda en Operación de Desaguado



Figura 17 Vista General Caseta de Desaguado de Lodo y Tolva de Lodos.

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de lodo

Con el fin de verificar que las principales estructuras y equipos de proceso del tren de tratamiento de lodo sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño más relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para esta evaluación se consideraron las siguientes premisas de cálculo:

- + Dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior
- + Producción de lodos, se estimó con base en la fórmula simplificada de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) con los datos de caudal medio de diseño y calidad de agua cruda promedio del histórico (SST y DBO), mismos que se utilizaron para la evaluación del tren de agua (US EPA, 1993).
- + Para determinar el volumen de lodos se utilizaron las concentraciones típicas esperadas en la purga de lodo secundario.
- + De manera conservadora, se consideró que los equipos mecánicos de desaguado operan en el rango menor indicado por el personal de operación, es decir 7 días a la semana, 20 horas al día.

En la Tabla 5 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de lodo, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR con las dimensiones de las estructuras y capacidades de equipos. En caso de no contar con algún dato de operación se consideró un valor promedio del rango típico.

Tabla 5:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR
Producción de lodo			
Producción de lodo esperada	kg SST /día	No aplica	1,962
Concentración		0.5 a 1.5%	0.70%
Flujo volumétrico	m3/día	No aplica	280
Digestión Aerobia de lodo			
Concentración de espesado en tanque	%		2%

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR
Volumen de lodo alimentado equivalente	m ³ /día		97.6
Tiempo de retención hidráulico (edad de lodo)	días	18 a 20	11.0
Carga de sólidos volátiles	kgSSV/m ³ -d	1.6 a 4.8	1.4
Destrucción esperada		38 a 50%	22%
Masa de lodo digerido estimada	kg SST /día		1,638
Desaguado de Lodo			
Días de operación por semana			7
Horas de operación por día			20
Ancho de banda	m	1 a 3	1.5
Carga de sólidos (por metro)	kg/h	250 a 410	55
Carga hidráulica (por metro)	L/min	150 a 340	54.2
Porcentaje de captura		90 a 98%	95%
Concentración de lodo desaguado esperada		12 a 22%	18.0%
Volumen de lodo desaguado	m ³ /día		10.4
Masa de lodo desaguado estimada	kg SST/día		1,557

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + El espesado de lodo influye fuertemente en el desempeño de la digestión y el desaguado de lodos posterior. A una concentración de 2% de lodo espesado, la edad de lodo en el digestor sería de 11 días, que es menor que la recomendada por la literatura de 18 a 20 días.
 - Conseguir una edad de lodo adecuada en el reactor requeriría aumentar el volumen de digestión y/o mejorar el desempeño del espesado de lodo secundario. Sin estas

acciones es muy probable que no se cumplan con los requisitos de estabilización de lodo señalados por la norma.

- + Al tiempo de operación mencionado por el personal de la planta, el filtro banda opera holgado y con cargas de sólidos e hidráulicas menores a las normales. Dado que para la evaluación se partió de estimados de producción de lodo y concentración, este escenario puede deberse a dos razones:
 - El tiempo de operación del filtro banda es en realidad menor. Sea en horas al día o días a la semana.
 - La concentración alimentada al filtro banda es menor, por lo que la limitante en el filtro banda se debe a la carga hidráulica. Es decir, la concentración en el digestor es menor que 2%, lo que requiere un mayor tiempo de funcionamiento del filtro banda.
- + En todo caso, una unidad de espesado de lodos formal, para alcanzar hasta 4% de concentración de sólidos en la corriente de purga de lodo secundario, disminuiría la complejidad de operación del digestor además de aumentar su desempeño y el del desaguado.

Estado de conservación y operación de las instalaciones

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de agua de la PTAR Pok Ta Pok, evaluadas con base en el cumplimiento de la NOM-001-2021 para suelo cárstico en DQO, SST, NT y PT con el promedio histórico de calidad de agua, se clasifican de **“Buena”**. En la sección **Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada**, se presenta la evaluación de dicha información.

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de lodos, determinadas con base en las condiciones operativas y de desempeño de las operaciones de espesado, digestión y desaguado observadas en la visita, se clasifican como **“Regulares”**. En términos generales las condiciones de mantenimiento de los trenes de tratamiento de agua y de lodos se consideran **“Regulares”**. En los párrafos subsecuentes se describe lo observado en la visita técnica efectuada a la PTAR.

La PTAR Pok Ta Pok fue construida en 1972, con lo que es una de las plantas con operación más larga de todas las del estado. Esto se hace evidente al recorrerla, aunque gracias a los esfuerzos operativos por parte de FONATUR, la mayor parte del tiempo opera adecuadamente. Así, el diseño de las operaciones y procesos, así como las dimensiones y características físicas de las unidades responden a criterios, prácticas y objetivos de tratamiento que ya no aplican y/o son obsoletas, destacando los siguientes aspectos:

- + Cribado de desbaste y en pretratamiento de operación manual
- + Bajo tirante hidráulico en los reactores de lodos activados
- + Baja profundidad de pared lateral en los clarificadores secundarios
- + Caseta de cloración abierta
- + Carencia de espesado de lodos formal (se realiza en la unidad con paros de aireación programados)
- + Volumen insuficiente en el digestor aerobio de lodos
- + Aireación mecánica en el digestor aerobio de lodos

Adicional a lo anterior, en la visita de campo se observaron los problemas e insuficiencias que a continuación se indican:

- + El Parshall no tiene capacidad para medir los flujos picos que ingresan a la PTAR, y detiene su medición a partir de los 320 L/s, por lo que no se sabe con certeza cual es el flujo máximo que recibe la PTAR.
- + El cárcamo de bombeo cuenta con suficiente capacidad para manejar los picos, pero la operación no está a cargo del personal de FONATUR. Esto requiere una mayor capacidad de manejo de flujo dentro de la PTAR.
- + El tanque de contacto de cloro está cubierto por losa de concreto, lo que impide su inspección y dificulta las labores de mantenimiento.
- + Carencia de equipo de monitoreo y manejo seguro del gas cloro, almacenado en tanques de 908 kg.

Con respecto al equipamiento mecánico existente se observa lo que a continuación se describe:

- + El equipo desarenador, está muy deteriorado y con operación deficiente, incluido el retiro y manejo de la arena.
- + El arreglo de las diversas tuberías de agua pretratada, by pass y recirculación es complejo, esto derivado del acomodo de los tanques dentro de la PTAR.
- + Las rastras, tornamesas e internos de los clarificadores secundarios registran condiciones moderadas de deterioro.
- + Los equipos de bombeo del tren de lodos (recirculación y purga, natas secundarias y lodo digerido), aunque todos están operativos y con adecuado mantenimiento, son equipos que requieren ser sustituidos a corto/mediano plazo, en algunos se observa, y lo confirmó el personal, que los motores se tomaron de otros equipos y plantas.
- + Los aireadores superficiales del digestor de lodos muestran deterioro moderado por los años y las condiciones ambientales, requieren sustitución por nueva tecnología.
- + El filtro banda para desaguado de lodo, si bien está en operación, muestra deterioro en sus elementos mecánicos, lo que afecta su operación y desempeño. Además, se encuentra operando cercano a su capacidad máxima. El no contar con un equipo de repuesto para esta unidad disminuye la flexibilidad de operación de la PTAR.

La obra civil de tanques, edificaciones, vialidades y las áreas verdes se observan con condiciones de mantenimiento de regulares; lo mismo aplica para las diversas tuberías de conducción de agua y de lodos.

Al igual que las otras PTAR de Fonatur, se percibe el esfuerzo del personal por mantener la planta en condiciones operativas y de aspecto aceptables, esto requiere un gran esfuerzo operativo, y de personal calificado para mantener la resiliencia del sistema. Esto en parte derivado de lo antiguo del sistema. Mantener la PTAR por mucho tiempo de esta manera resulta contraproducente.

La obra e instalaciones eléctricas, como son la subestación, el Centro de Control de Motores, red de fuerza y alumbrado exterior, exceptuando la planta de emergencia, se observan en condiciones adecuadas de mantenimiento.

En el Anexo 1 (Ficha de la PTAR) se presenta la descripción detallada de las características y condiciones actuales de operación y mantenimiento de las estructuras y equipos del tren de agua y lodos.

Análisis de calidad del agua cruda

Calidad de agua cruda, histórica

Se incluyen diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos, la información fue proporcionada por FONATUR, los análisis fueron efectuados por un laboratorio acreditado ante la EMA. Se proporcionaron datos de ocho muestreos efectuados en el influente durante el periodo del año 2020 al 2021 de tipo simple.

Los parámetros incluidos en las bases de datos de FONATUR son los siguientes:

- + Temperatura
- + pH: Potencial de hidrógeno
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos sedimentables
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)
- + Coliformes fecales
- + Huevos de helminto

Debido a que los resultados de los muestreos fueron previos a la actualización de la NOM-001-SEMARNAT-2021, las bases de datos no incluyen los parámetros adicionales de la nueva norma, como color verdadero, toxicidad y *E. Coli*, así mismo incluyen parámetros que no son objeto de estudio en la actual norma, sin embargo, si permiten determinar la calidad de los procesos de tratamiento del agua residual.

A continuación, se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Pok Ta Pok.

Tabla 6:
Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)

Concepto	pH	G & A mg/L	SST mg/L	DBO mg/L	DQO mg/L	NT mg/L	NTK mg/L	PT mg/L	Coliformes fecales NMP/100 mL
No. de datos	8	8	8	8	8	6	8	7	8
Mínimo	6.1	5.8	14	17	34	1.19	0.63	1.36	75
1° Cuartil	6.9	12.8	36	55	129	2.81	2.12	1.53	131
Promedio	7.2	16.0	106	100	209	4.42	4.01	2.01	1,008
Mediana	7.3	16.6	74	105	196	3.73	3.61	1.67	780
3° Cuartil	7.6	18.2	133	144	294	5.44	6.25	2.10	1654
Máximo	7.9	27.4	343	169	399	9.37	7.42	3.76	2,400

Calidad de agua cruda, de este Estudio

Del 29 al 30 de septiembre se efectuó un muestreo compuesto de 24 horas tanto en el influente y efluente de la PTAR Pok Ta Pok, este se efectuó con seis muestras simples, a cada una de estas se les realizaron los siguientes análisis de campo:

- + pH
- + Temperatura del agua
- + Cloro residual libre (efluente)

Los parámetros analizados en el laboratorio fueron los siguientes:

- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)

- + Fósforo total (PT)
- + Escherichia coli (efluente)
- + Toxicidad Vibrio fischeri (efluente)
- + Huevos de helminto
- + Color verdadero (UV-Vis) a 436, 525 y 620 nm

Las actividades de colecta, preservación y análisis de las muestras fueron realizadas por personal de Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis (Intertek + ABC Analitic), éste cuenta con la acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA) en la rama de agua número AG-096-029/11 para su laboratorio ubicado en la ciudad de México y AG-096-029/11_S1 para el laboratorio de Mérida, que es donde se realizarán los análisis.

En todos los casos, la preservación y el almacenamiento de las muestras se efectuaron de acuerdo con los lineamientos que establece la normatividad mexicana. Las muestras colectadas fueron preservadas con hielo a una temperatura de 4°C con la intención de que no se degradaran, y fueron transportadas en una hielera al laboratorio correspondiente para su análisis.

El transporte se hizo con sumo cuidado, de tal forma que se evitaron los derrames y/o contaminación de muestras debido a rupturas de frascos o cualquier otro accidente. Los diferentes frascos que integran las muestras se preservaron con los reactivos señalados en la normatividad.

En el Anexo 3 se presentan los resultados completos del laboratorio del influente y efluente de la PTAR Pok Ta Pok. En la Figura 18 se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Pok Ta Pok.

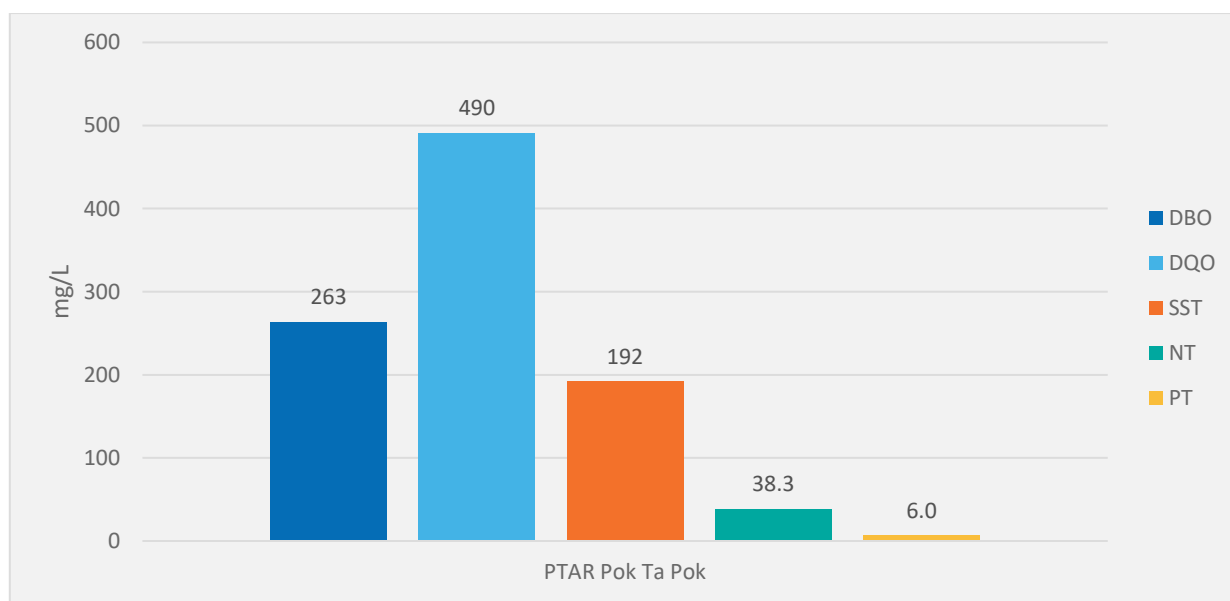


Figura 18 Caracterización del agua cruda (sep-2022)

Con la finalidad de conocer la relación de contaminantes, se realizaron los cálculos que a continuación se presentan en la siguiente tabla, los cuales fueron determinados con los promedios obtenidos anteriormente en la tabla y figura previas.

Tabla 7:
Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente

Relación	Promedio (2020-2021)	Valor Estudio 2022	Rango típico en Aguas Residuales Municipales ¹
DBO ₅ / DQO	0.48	0.54	0.45 – 0.55
SST/ DBO	1.06	0.73	0.80 – 1.20
NTK/ DBO	0.04	0.15	0.10 – 0.20
Fósforo/ DBO	0.02	0.02	0.02

¹ (US EPA, 1993)

De las relaciones anteriores resalta NTK/DBO del promedio histórico de FONATUR, el valor de NTK es muy bajo en relación a la DBO, probablemente existe un error en su determinación.

Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada

En las siguientes figuras y tablas se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada del histórico de datos proporcionados por FONATUR y de los obtenidos en el presente Estudio, en estas se presentan los límites permisibles (LP) establecidos en la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelo cárstico.

Calidad de agua tratada, histórica

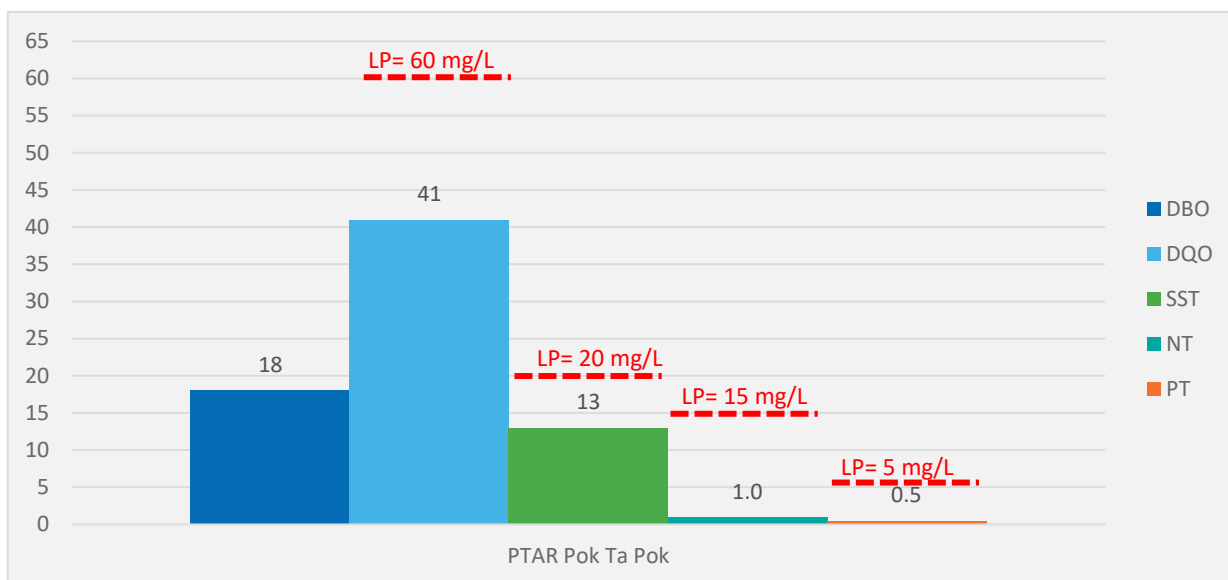
Se proporcionaron datos de 215 muestreos efectuados en el efluente durante el periodo del año 2020 al 2021, en su mayoría fueron muestreos de tipo compuesto.

En la siguiente tabla se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros en el agua tratada de la PTAR Pok Ta Pok.

Tabla 8:
Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)

Concepto	G & A mg/L	SST mg/L	DBO mg/L	DQO mg/L	NT mg/L	NTK mg/L	PT mg/L	Huevos de helminto huevos/L	Coliformes fecales NMP/100 mL
No. de datos	215	215	215	202	213	215	215	215	215
Mínimo	5.0	1	7	18	0.61	0.49	0.25	0	3
1° Cuartil	5.8	7	13	30	0.63	0.63	0.30	0	6
Promedio	5.9	13	18	41	1.01	0.93	0.46	0	35
Mediana	5.8	11	15	36	0.94	0.82	0.56	0	14
3° Cuartil	6.4	17	21	46	1.27	1.14	0.56	0	52
Máximo	12.7	50	74	225	3.56	3.44	1.68	0	240

A manera de resumen en la Figura 19 se presentan los valores promedio de los principales parámetros del agua tratada de la PTAR Pok Ta Pok, en esta se indican los límites permisibles (LP) para el promedio mensual en la NOM-001-2021.

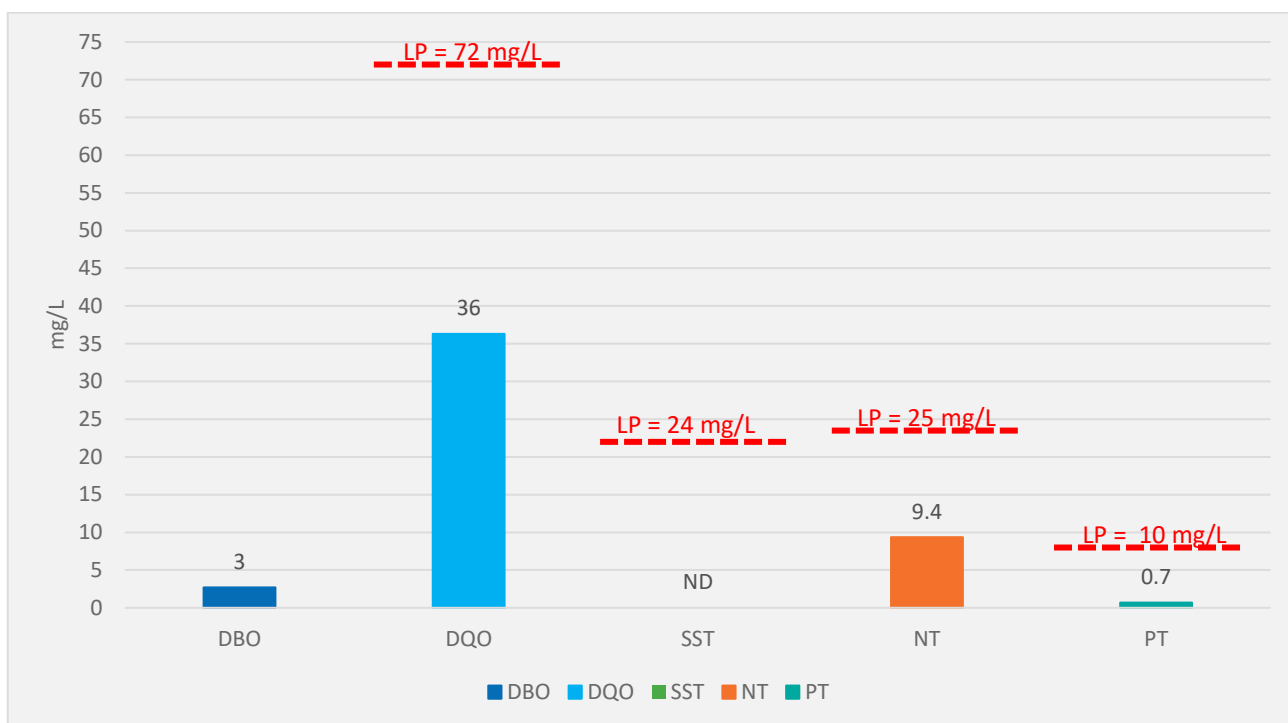


LP = Límite permisible

Figura 19 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)

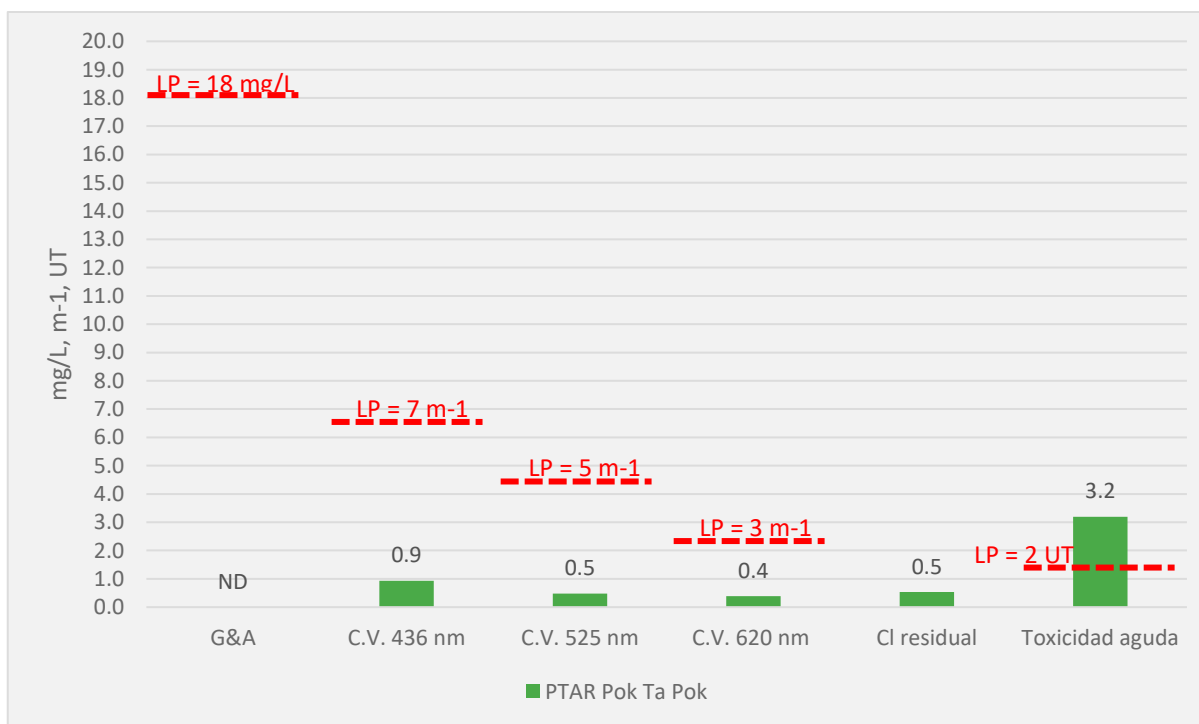
Calidad de agua tratada, de este Estudio

En la siguientes figuras y tabla se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada de la PTAR Pok Ta Pok, en estas se indican los límites permisibles para el promedio diario en la NOM-001-2021.



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 20 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 21 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)

Tabla 9:
Caracterización del agua tratada de este Estudio (*E.coli* y Huevos de helminto)

Parámetro	Unidades	PTAR Pok Ta Pok	Límite permisible NOM-001
E.coli	NMP/100 mL	294	100
Huevos de helminto	HH/L	<0.2	1

Con la información histórica de calidad de agua tratada proporcionada por FONATUR y los resultados de los análisis efectuados se efectuó el análisis del cumplimiento de los principales parámetros de calidad del agua con respecto a la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021, para los valores de los datos históricos se utilizó el límite permisible del valor promedio mensual y para los resultados de los muestreos efectuados en este estudio se utilizó el límite permisible del valor promedio diario.

Tabla 10:
Cumplimiento del agua tratada

Parámetro	Valor promedio histórico (2020-2021) (mg/L)	Valor Estudio 2022 (mg/L)	Límite permisible NOM-001-2021	Cumple
SST	13	No detectado	PM = 20 (mg/L) PD = 24 (mg/L)	SI
DQO	41	36	PM = 60 (mg/L) PD = 72 (mg/L)	SI
Nitrógeno total	1.0	9.4	PM = 15 (mg/L) PD = 25 (mg/L)	SI
Fósforo total	0.5	0.7	PM = 5 (mg/L) PD = 10 (mg/L)	SI

PM = promedio mensual, PD = promedio diario

Con respecto al color verdadero, en las tres longitudes de onda se obtuvieron valores dentro del límite permisible, la concentración de *E. Coli* y el valor de toxicidad estuvieron por encima del límite permisible, la toxicidad dió alta debido a que la muestra se tomó aguas abajo de la etapa de cloración.

Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua

Como parte de las actividades realizadas en campo, se registraron las coordenadas de los pozos de infiltración de cada PTAR, utilizando un equipo GPS map 60Cx marca Garmin. En la siguiente tabla se presentan las coordenadas de localización de los pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR Pok Ta Pok, su ubicación en el arreglo general puede observarse también en la Figura 3. Posteriormente, en la Figura 22 se presentan fotografías correspondientes al levantamiento de las coordenadas con GPS y de los registros o brocales de los pozos de infiltración.

Tabla 11:
Ubicación de pozos de infiltración PTAR Pok Ta Pok

Concepto	Latitud	Longitud
Pozo de infiltración 1	21.133025	-86.759494
Pozo de infiltración 2	21.133354	-86.759591
Pozo de infiltración 3	21.133444	-86.759386
Pozo de infiltración 4	21.133171	-86.759249
Pozo de infiltración 5	21.13297	-86.75916
Pozo de infiltración 6	21.132851	-86.759325
Pozo de infiltración 7	21.132391	-86.759518
Pozo de infiltración 8	21.132376	-86.759846
Pozo de infiltración 9	21.132383	-86.76004
Pozo de infiltración 10	21.132357	-86.760216



Figura 22 Pozos de infiltración PTAR Pok Ta Pok

Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR

Pendiente de incorporar, no se ha recibido la información por parte de Aguakan.

Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) reportados por el Organismo Operador

De acuerdo a la información proporcionada por FONATUR, el costo total de O & M de la PTAR Pok Ta Pok en el año 2021 fue de 10.99 millones de pesos (mdp's), desagregado de la siguiente forma:

- + Costo de operación: 8.77 mdp's
- + Costo de mantenimiento: 2.22 mdp's

Considerando que el caudal medio de agua tratada en el año 2021 fue de 200 L/s, que representa un volumen anual de 6,307,200 m³, el costo unitario de O & M es de 1.74 \$/m³ de agua tratada.

En relación con la energía eléctrica consumida en el proceso de tratamiento, la información proporcionada indica los siguientes valores anuales:

- + Consumo anual de energía: 2,109,012 kWh

- + Costo anual: \$ 5,699,328

A partir de los valores previos se calcularon los siguientes indicadores:

- + Costo unitario de la energía. 2.70 \$/kWH
- + Consumo unitario de energía: 0.33 kWH/m³
- + Costo energía respecto al costo O & M: 52 %

En la información de costo de O & M, así como la de consumo y costo de energía eléctrica se debe tener en cuenta que la PTAR Pok Ta Pok incluye, además de los trenes de agua y lodo, las siguientes instalaciones:

- + Bombeo de agua tratada para uso en riego de áreas verdes públicas por FONATUR,
- + Bombeo del agua tratada que se comercializa con usuarios particulares.

En la PTAR Pok Ta Pok el cárcamo final es operado por Aguakan, quien es responsable del pago de la energía eléctrica consumida.

Estimación de los costos de operación y mantenimiento

A efecto de comparar el costo de operación reportado por FONATUR contra un costo de referencia se procedió a estimar los costos anuales de un grupo de insumos relevantes:

- + Energía eléctrica,
- + Cloro para desinfección,
- + Polímero para espesado y/o desaguado de lodo,
- + Acarreo de lodo desaguado, y
- + Análisis de laboratorio de agua tratada y lodo para cumplimiento normativo y control de proceso
- + Personal de O & M

Para lo anterior, con base en un caudal medio de 200 L/s y la información de calidad de agua cruda y tratada proporcionada por FONATUR se efectuó un balance de materia simplificado para establecer la masa de DBO removida, la generación de lodos en el proceso de tratamiento, la remoción de sólidos suspendidos volátiles en el proceso de digestión y la masa de lodo desaguado a disposición.

Una vez definidos en el balance de materia los valores requeridos, se procedió a aplicar los

factores de dosificación o consumo de los principales insumos (energía eléctrica, cloro polímero para espesado y/o polímero para desaguado) con base en la masa de lodo generada y las prácticas adecuadas de operación. En el caso de los análisis de laboratorio de agua tratada y lodos, a partir de los requerimientos normativos.

En la se presentan las consideraciones aplicadas para establecer el consumo de los insumos arriba indicados, así como el costo unitario asignado:

Tabla 12:
Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Energía eléctrica	Caudal medio de agua tratada y concentración promedio de DBO	2.08 kWh/kgDBO	2.50 \$/kWh
Cloro	Caudal medio de agua tratada	5.0 mg/L	20 \$/kg
Polímero para espesado	Producción de lodo con base en caudal medio y concentración promedio de DBO y SST	4.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Polímero para desaguado	Fracción volátil del 75 % del lodo producido y remoción del 40 % de SSV en digestor	7.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Acarreo lodo desaguado, base húmeda	Lodo desaguado al 20 % de sólidos Masa de lodo en base seca/0.20	Ton de lodo en base húmeda	150 \$/ton
Análisis laboratorio Agua tratada	NOM-001 población > 50 mil habitantes	2 muestreos/mes	8,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Lodo / biosólidos	NOM-004 hasta 1,500 ton/año (base seca);	1 muestreo/año	10,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Control de proceso	---	1 lote por mes	6,000 \$/mes

El costo del mantenimiento preventivo de la PTAR y los consumibles asociados a esa actividad

se estimó aplicando el criterio de destinar un importe anual equivalente al 0.85 % del costo de inversión de la planta con sus actuales características. El costo de la planta se estableció a partir de un costo base de 750 mil pesos por litro – segundo de capacidad media instalada.

Para establecer el costo del personal de operación y mantenimiento se considera una plantilla “tipo” de doce personas, misma que se desagrega en las siguientes plazas: 1 Jefe de planta, 2 Supervisores de operación/mantenimiento, 5 operadores y 4 auxiliares de operación o mantenimiento.

Los sueldos considerados para establecer este rubro de costo están en el rango de 28,000 pesos mensuales para el Jefe de planta y de 12,000 pesos por mes para el auxiliar de operación, los sueldos del resto del personal están comprendidos dentro de este rango.

Los sueldos nominales se afectaron por un factor de 1.50 para incorporar el costo de las diversas prestaciones y seguridad social del personal. De esta forma se determinó un costo total mensual de \$ 306, 000 por concepto de personal.

El factor unitario de consumo de energía eléctrica asignado permite establecer, además de la energía consumida por la planta, otros dos indicadores que en la PTAR Pok Ta Pok tienen el siguiente valor:

- + Consumo unitario de energía: 0.42 kWh/m³
- + Potencia media de operación: 764 kilowatts

En la Tabla 13 se presentan los consumos e importes anuales de los rubros de costo establecidos, así como el costo unitario de cada rubro, al dividir su importe anual entre el volumen de agua tratada. Posteriormente, en la Figura 23 se presenta de manera gráfica el costo unitario desagregado por insumo.

Tabla 13:
Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M

Insumo	Consumo anual	Importe anual \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Energía eléctrica	2,676,271	6,690,678	1.06
Cloro	31,536	630,720	0.10
Polímero para espesado	5,241	786,192	0.12
Polímero para desaguado	7,338	1,100,669	0.17
Acarreo lodo desaguado	4,586	687,918	0.11
Análisis laboratorio		274,000	0.04
Mantenimiento		1,561,875	0.25
Personal de O & M		3,672,000	0.58
Total		15,404,053	2.44

Energía eléctrica consumo anual expresado en kWh; cloro, polímero para espesado y polímero para desaguado, en kg; acarreo de lodo, en toneladas.

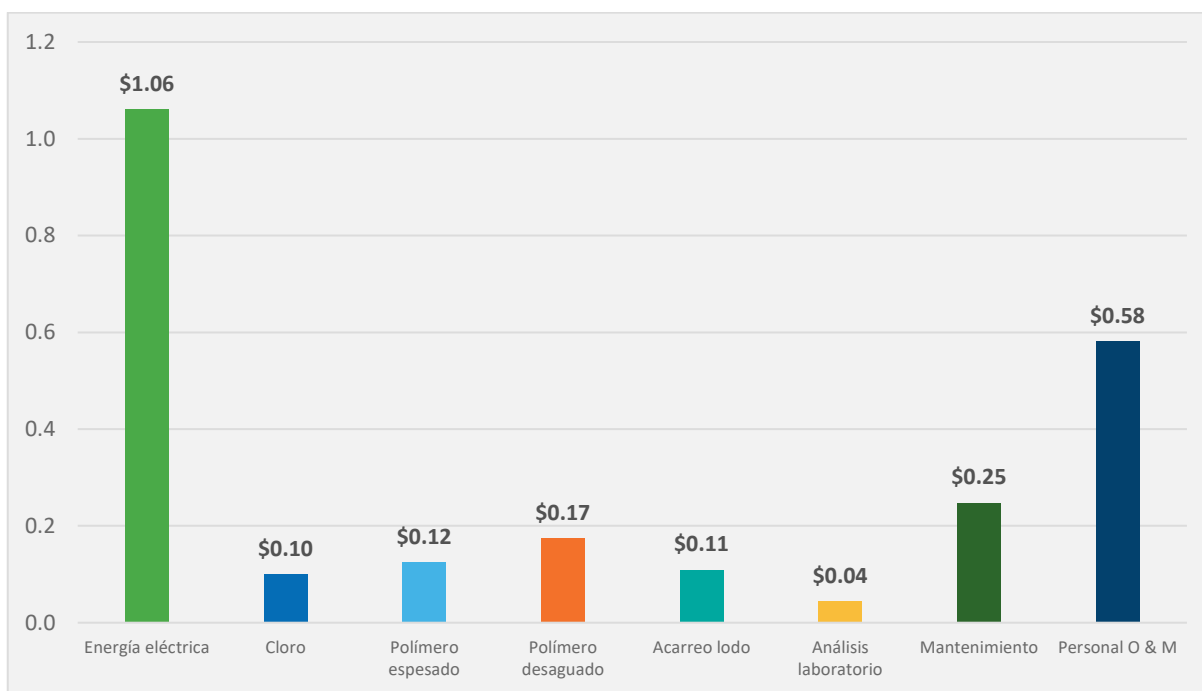


Figura 23 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m³

El importe anual de operación y mantenimiento estimado en esta sección es de 15.40 millones de pesos, con un costo unitario de O & M de 2.44 pesos por metro cúbico de agua tratada.

Al comparar el importe estimado anual de O & M con el importe con importe reportado por FONATUR, de 10.99 millones de pesos, se tiene una excedencia de 4.42 mdp's en el costo estimado con respecto al reportado, que representa una diferencia de $\approx - 29 \%$.

No obstante los criterios y premisas generales que se aplican en el método para estimar los costos, la diferencia que se obtiene indica moderada insuficiencia en los recursos económicos y medios materiales que se destinan para la operación y mantenimiento de la PTAR Pok Ta Pok.

Por lo antes expuesto, se considera que el costo de O & M reportado refleja las condiciones de operación y mantenimiento que se observaron en las visitas efectuadas a la planta, así como en la evaluación de la calidad de agua tratada.

Se hace hincapié en que parte sustancial de la problemática de operación de la planta se debe a la obsolescencia o carencia de equipos electromecánicos de proceso.

Observaciones y recomendaciones generales

A continuación, se presentan las observaciones y recomendaciones que se desprenden de la evaluación de la información proporcionada por la CAPA y del diagnóstico en campo y gabinete de la PTAR Pok Ta Pok. Por su semejanza con otras PTAR de FONATUR las recomendaciones son similares a otras de la zona:

1. En general, es necesario un mantenimiento general de vertedores, canales, tuberías de conducción, soportes, entre otros, pues se observa un deterioro medio en la mayoría de estas estructuras.
2. Actualmente, se requiere de un esfuerzo operativo intensivo para mantener la calidad de agua tratada dentro de los límites permisibles. Algunas de las tareas operativas podrían ser simplificadas con la inclusión de nuevas tecnologías y renovación de equipos mecánicos.
3. Se recomienda la inclusión de un tanque regulador para procesar el caudal pico que llega a la PTAR. Especialmente debido a que el control del cárcamo de agua cruda tiene un control ajeno a FONATUR. Adicionalmente, esto mejoraría la flexibilidad de operación de la PTAR.
4. Se recomienda reemplazar el pretratamiento manual actual por uno mecánico y mejorar el sistema de desarenación. Los equipos deberán estar diseñados para soportar el caudal pico que ingresa a la PTAR, especialmente el Parshall.
 - Dado que no se cuenta con el caudal pico exacto de que ingresa a la PTAR, debido a la falta de capacidad de medición del canal Parshall, este se debe seleccionar con base en otros registros de operación e históricos este valor.
5. El pretratamiento instalado deberá ser de tipo automático pues las basuras y arenas influentes representan una cantidad considerable para manejarse por un operador. Además, se debe considerar incluir el tratamiento de los residuos recolectados como compactadores de cribados, lavadores y clasificadores de arena.
6. Para asegurar el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, es necesario implementar un sistema formal de remoción de nitrógeno. Por su flexibilidad operativa y el espacio existente, se recomienda un esquema de zona preanóxica-aerobia, con recirculación interna.
7. En la adaptación de la PTAR para el cumplimiento de nueva normativa, se deberá reservar espacio y carga hidráulica para tanque anaerobio para remoción de fósforo, por si aumenta la concentración en el agua cruda.

8. Los clarificadores secundario existentes tienen capacidad para recibir más caudal del de diseño actual de la PTAR (245 L/s) aunque para mejorar la operación se debe asegurar que la distribución de caudal a cada uno sea proporcional a su capacidad.
9. Se requiere implementar un sistema formal de seguridad y dosificación para el gas cloro. Las condiciones actuales no cumplen con diversas normas de seguridad en el trabajo para el manejo de cloro. Además, se debe implementar el equipo necesario para contabilizar el gasto de este reactivo.
10. Según sea el caso, es necesario reemplazar los equipos de bombeo a riego que se encuentren obsoletos u operen con bajas eficiencias energéticas.
11. Tomando en cuenta el reúso intensivo del agua tratada, se recomienda incorporar una etapa de filtración terciaria para asegurar la calidad efluente.
12. Es necesario implementar una etapa de espesado de lodo para mejorar el desempeño de la digestión de lodos y el desaguado.
13. Se recomienda ampliar el volumen de digestión aerobia, además de cambiar el tipo de aireación mecánica por un sistema difuso. Esto permitirá tener una mayor flexibilidad de operación en el desaguado y asegurar una destrucción de lodos acorde a la norma.
14. Es necesario reemplazar los equipos de bombeo de lodos (recirculación, lodo digerido, etc.) pues, aunque son funcionales, presentan deterioro medio y algunos han sido complementados con motores diferentes a su diseño.
15. Es necesario ampliar la capacidad de desaguado de la planta para operar por menos tiempo y poder recibir una mayor cantidad de sólidos diarios. Operar los equipos por la mayor parte del día, además de tener solo uno, disminuye la flexibilidad de operación de la PTAR y se puede convertir en un cuello de botella. Esto requerirá la ampliación del equipo de preparación de polímero también.
16. El hecho de que el agua ingrese diluida al tratamiento representa una ventaja para facilitar el cumplimiento de la norma en remoción de contaminantes, aunque coloca la mayor parte de las limitantes de proceso en aspectos hidráulicos de las unidades. Los diseños de ampliación deben tomar en cuenta este factor.

2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Las acciones que se proponen para la PTAR Pok Ta Pok consideran que el caudal medio de diseño se mantiene sin cambio respecto al actual, de 245 litros por segundo.



Figura 24 Vista actual de la PTAR Pok Ta Pok

En la Tabla 14 se presenta el resumen de las acciones propuestas para que la planta pueda cumplir con las especificaciones y límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para las descargas a suelo cárstico.

Tabla 14:
Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Pok Ta Pok

Etapa de Tratamiento	Pok Ta Pok
TREN DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	Se incorpora
Regulación agua cruda/pretratada	Se incorpora
Sedimentación primaria	No aplica
Filtro biológico	No aplica
Biológico remoción DBO	Existente, mejoramiento
Biológico remoción de fósforo	No aplica
Biológico remoción nitrógeno	Se incorpora
Filtración terciaria	Se incorpora
Desinfección	Cloro gas existente, mejoramiento
TREN DE LODO	
Espesado	Se incorpora
Digestión aerobia	Existente, mejoramiento
Digestión anaerobia	No aplica
Desaguado	Existente, mejoramiento

En la Tabla 17 se presenta la descripción y características de las acciones propuestas de rehabilitación, mejoramiento o incorporación de etapas y/o equipos para la PTAR Pok Ta Pok.

Tabla 15:
Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Pok Ta Pok

Etapas de tratamiento	Pok Ta Pok
TREN DE AGUA	
Pretratamiento	1. Incorporar criba de desbaste, con limpieza mecánica 2. Ampliar capacidad de pretratamiento para manejar caudal pico influente a PTAR. • Ampliar Parshall para medir este caudal. • Posibilidad de elevar el pretratamiento para requerimientos de nivel hidráulico en unidades nuevas de reactores de lodos activados. 3. Incorporar equipos de cribado grueso y cribado fino, de operación y limpieza mecánica • Con claro de 15 y 5 milímetros 4. Incorporar equipos de prensado de sólidos gruesos y finos 5. Incorporar unidad de desarenación y equipo clasificador de arena • Desarenador tipo cámara aereada, con desengrasado Anticipar caudales picos mediante registros de operación y/o reuniones operativas con Aguakan.
Tratamiento Primario	1. Incorporar regulación de agua cruda o pretratada • Tanque regulador nuevo a considerar en la ampliación de la PTAR • Para reducir los sobreflujos y derrames de agua cruda hacia cuerpos receptores. Con aireación para evitar condiciones sépticas
Tratamiento Secundario	1. Evaluar posibilidad de adaptar dos reactores de flujo pistón (los más pequeños) a anóxico/aerobio cambiando la distribución de aire por sección y disminuyendo el caudal influente a estos dos reactores. • De esta manera las estructuras adicionales (anaerobio y anóxico) se construyen solamente para los reactores más grandes. 2. Reservar espacio y carga hidráulica en caso de requerir en el futuro tanque anaerobio para remoción biológica de fósforo, por si aumenta la concentración en el agua cruda 3. Incorporar tanque anóxico para remoción biológica de nitrógeno

Etapa de tratamiento	Pok Ta Pok
	• Agitadores sumergibles • Bombas de recirculación interna de licor mezclado 4. Agregar mamparas a reactores de mezcla completa para mejorar desempeño. 5. Aumentar el volumen de la etapa aerobia del reactor a. Aumentar según sea necesario el suministro de aire para lograr la nitrificación. Cambio de sopladores a equipos tipo turbo.
Clarificación Secundaria	1. Rehabilitar y nivelar rastras, mamparas, vertedores e internos de los clarificadores secundarios 2. Sustituir las bombas de recirculación de lodo actuales que no van de acuerdo con el diseño. 3. Incorporar bombas de purga de lodos activados para alimentación sincronizada con equipo de espesado.
Tratamiento Terciario	1. Incorporar filtración terciaria • Tipo tambor parcialmente sumergido, o de marco fijo, con claro de malla < 20 micras
Desinfección	1. Incorporar sistema de desinfección ultravioleta • Para desinfección del agua tratada a infiltración 2. Habilitar caseta de desinfección con cloro de tipo confinado • Para desinfección del agua para reúso (% del caudal) • Como respaldo del sistema UV
TREN DE LODO	
Espesamiento de lodos	1. Incorporar equipo mecánico para espesado de purga de lodo secundario • Tipo mesa espesadora
Digestión de lodos	1. Aumentar volumen de digestor aerobio 2. Sustituir aireadores mecánicos por sopladores y difusores

Etapa de tratamiento	Pok Ta Pok
	• Sopladores tipo centrifugo o turbo • Difusores de burbuja media o gruesa
Desaguado de lodos	1. Incorporar un nuevo equipo para desaguado de lodos como respaldo del filtro banda existente • Filtro banda 2. Sustituir sistema de preparación de polímero para espesado y desaguado • Común para espesado y desaguado de lodos
Secado adicional de lodo desaguado	1. No aplica
TEMAS VARIOS	2. Con medición de flujo en las corrientes de agua y lodo: agua cruda, agua tratada; recirculación y purga de lodos, lodo digerido, otros. 3. Sensores para control de proceso, enfocados a la eficiencia energética, ahorro de reactivos y control de la calidad del agua tratada: TBD. 4. Arrancadores suaves y variadores de frecuencia para los principales equipos: bombas de agua cruda, de recirculación de lodo, de purga de lodo, lodo espesado, lodo digerido; sopladores.

A continuación, en la Figura 18 se presenta el diagrama de flujo del tren de tratamiento de agua y de lodos de la PTAR Pok Ta Pok incorporando las acciones propuestas para que la planta produzca agua tratada que cumpla con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas a suelo cárstico.

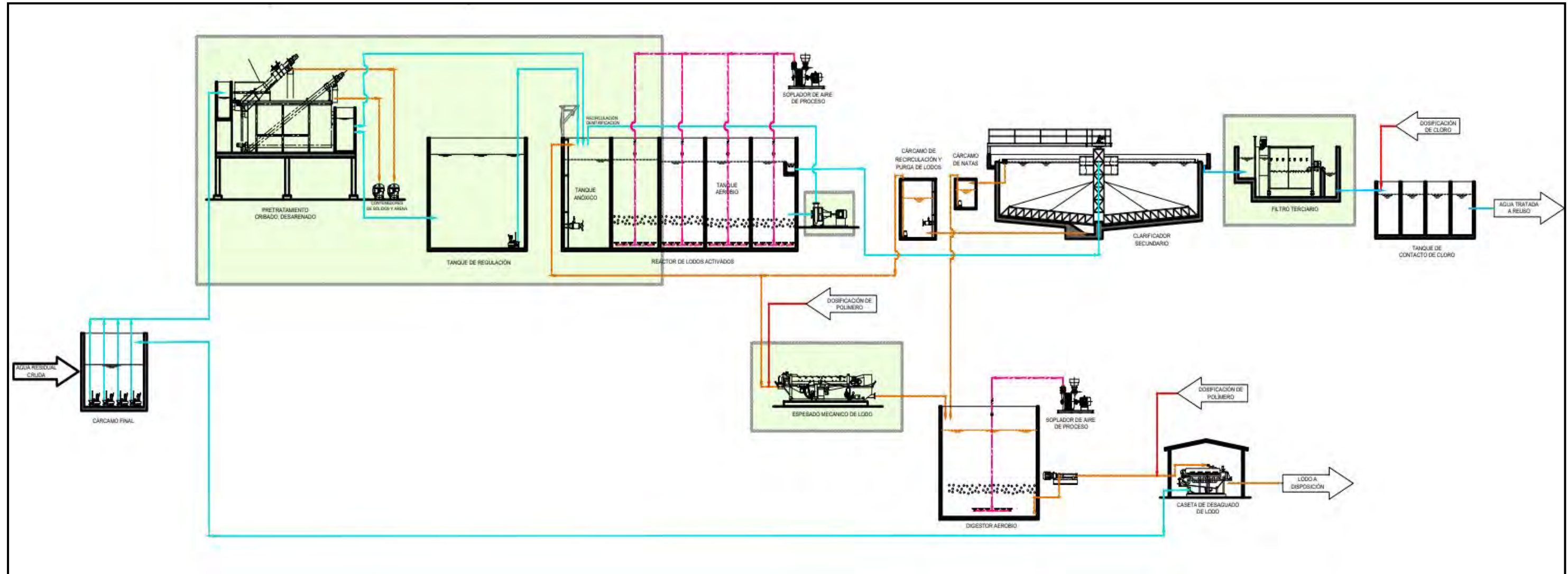


Figura 25 Diagrama de flujo de la PTAR Pok Ta Pok con las acciones propuestas

A decorative graphic consisting of three wavy, horizontal lines in blue, green, and grey, located on the left side of the page.

3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Las acciones de mejora surgen de la visita y diagnóstico técnico que se presenta previamente, así como de las entrevistas e información recabada con las áreas responsables de la operación y gestión de los recursos para saneamiento.

Techo financiero

El techo financiero para la implementación de las acciones de mejora y rehabilitación de la PTAR se realizó a partir de costos paramétricos, como lo indican los Términos de Referencia.

Para lo anterior se recurrió a costos base de unidades de proceso y equipamiento similares y de capacidad comparable con las necesidades de las PTAR que forman parte de este estudio, de igual manera dichos costos son ajustados de acuerdo con la capacidad necesaria.

En la Tabla 16 se muestran los costos base por unidad de proceso, los cuales corresponden al costo de mercado establecido en proyectos realizados en el año 2021 y 2022 en Quintana Roo, en plantas de tratamiento con proceso de remoción biológica de nitrógeno y fósforo, así como equipamiento electromecánico y de proceso, tanto de tipo convencional como relativamente nuevo en la región, como es la filtración terciaria y la desinfección con lámparas ultravioleta.

Tabla 16:
Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad para 150 L/s de caudal medio

Unidad de proceso	Costo base en MDP
Tren de Tratamiento de Agua	
Pretratamiento mecánico	20.97
Regulación agua cruda/pretratada	12.65
Sedimentación primaria	13.12
Caja distribuidora agua primaria	0.99
Filtro biológico	
Biológico remoción DBO	22.99
Biológico remoción de fósforo	2.50
Biológico remoción nitrógeno	5.75
Clarificación secundaria	14.80
Recirculación y purga de lodo	6.89
Filtración terciaria	12.12
Desinfección	10.49
Pozo de infiltración	1.60
Tren de Tratamiento de Lodo	
Espesado de lodo	7.79
Digestión aerobia	16.09
Digestión anaerobia	59.55
Tanque de lodo digerido	3.77
Desaguado de lodo	17.43
Cogeneración	18.81

Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con las acciones a realizar en la PTAR se estimaron los costos de inversión, esto de acuerdo con los costos base y el factor de ajuste, los cuales están relacionado con el caudal de tratamiento.

A continuación se describe el procedimiento aplicado a cada planta de tratamiento (identificada como PTAR "n") para establecer el techo financiero preliminar de los recursos económicos requeridos para implementar el plan de acciones:

1. Los costos de referencia de las unidades de proceso se ajustaron a valores de noviembre de 2022 con el factor de actualización que resulta de dividir el INPC de noviembre entre el INPC del mes en que se originó el presupuesto.

A manera de ejemplo, a continuación se describe el procedimiento:

- Fecha del presupuesto de la unidad de proceso o PTAR de referencia: octubre de 2021.
- Valor del INPC en octubre de 2021: 115.561
- Valor del INPC de noviembre de 2022: 125.997
- Factor de actualización costo de referencia: $125.997/115.561 = 1.090$

2. El costo de referencia del proceso de digestión anaerobia y del sistema de cogeneración se determina con base en un digestor anaerobio con sistemas periféricos; tamizado de lodo, tratamiento lateral de la corriente de desaguado de lodo anaerobio; antorcha de quemado de biogás, gasómetro para almacenar el biogás generado, acondicionamiento de biogás; caseta de equipos de digestión y sistema de cogeneración.

En la siguiente tabla se presenta el desglose y capacidad de los componentes de las etapas de digestión anaerobia de lodos y del sistema de cogeneración:

Etapas de Digestión Anaerobia de Lodo

Concepto	Importe actualizado, mdp
Tamizado de lodo (capacidad para 5 L/s de lodo espesado al 5%)	1.22
Digestor anaerobio mesofílico (de 5,700 m3)	43.25
Gasómetro de membrana y periféricos (de 1,000 m3)	6.14
Quemador de biogás y periféricos (capacidad para 225 m3/h)	1.59

Concepto	Importe actualizado, mdp
Edificios operativos	2.71
Tratamiento lateral del agua retirada en desaguado de lodo	4.64
Subtotal	59.55
Obra eléctrica (12 % del subtotal)	7.44
Control (3 % del subtotal + obra eléctrica)	2.01
Contingencias (8 % del subtotal + obra eléctrica + control)	5.52
Total	74.53

Sistema de Cogeneración

Concepto	Importe actualizado, mdp
Sistema de tratamiento de biogás (capacidad para 225 m ³ /h) para remoción de humedad, impurezas y H ₂ S	7.10
Sistema integral de cogeneración (capacidad de 500 kW eléctricos)	11.72
Total	18.81

El costo actualizado de las unidades de proceso se ajustó posteriormente en función de la capacidad (a caudal medio) de las unidades de proceso de la PTAR "n", en relación con la capacidad de la PTAR de referencia, acorde a lo siguiente:

$$\text{Costo PTAR "n"} = \text{Costo PTAR de referencia} * ((\text{Tamaño PTAR "n"} / \text{Tamaño PTAR referencia})^{0.70})$$

La capacidad de la PTAR de referencia es para un caudal promedio de 150 L/s.

A manera de ejemplo, al utilizar la ecuación anterior, y considerando que la PTAR "n" es de 350 L/s de capacidad, se obtiene un multiplicador de 1.81, mismo que se aplica sobre el importe de las unidades de proceso de la PTAR de referencia.

De esta forma, en lugar de ajustar el costo de la PTAR "n" con una relación lineal entre el tamaño de ambas plantas (2.33), el criterio toma en cuenta que el costo unitario de

inversión (\$ por L/s de capacidad) disminuye al aumentar el tamaño de la unidad de proceso y/o de la PTAR.

Este procedimiento de ajuste de costo se utilizó en las unidades de proceso cuyo dimensionamiento está determinado por la capacidad y carga hidráulica, como es el caso de las etapas que a continuación se indican:

- Pretratamiento (cribado y desarenación)
- Regulación y/o bombeo de agua cruda/pretratada
- Sedimentación primaria
- Caja distribuidora agua primaria
- Clarificación secundaria
- Recirculación y purga de lodo
- Filtración terciaria
- Desinfección
- Tanque de lodo digerido

Asimismo, el procedimiento de ajuste de costo descrito en este numeral también es aplicable en los procesos biológicos de tratamiento de agua y en las operaciones y procesos del tren de tratamiento de lodos, cuando en la PTAR "n" se presenta la condición de carga influente orgánica y de sólidos que se describe en el siguiente numeral.

3. El factor de ponderación arriba referido se utiliza de manera directa si la carga contaminante influente a la PTAR "n", expresada como la concentración promedio de la DBO y SST en el agua residual cruda, es comparable a la de ($\leq 20\%$) la PTAR de referencia.

La concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente a la PTAR de referencia es 350 mg/L.

Se considera que el agua residual influente a la PTAR "n" es comparable al agua residual de la PTAR de referencia, cuando la concentración promedio de DBO y SST está en el rango de $\pm 20\%$ a la concentración indicada en el párrafo previo.

4. A continuación se enlistan las operaciones y procesos del tren de tratamiento de agua y de lodos que, en caso de variación mayor al 20 % en la concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente, estarían sujetos a ajuste de costo adicional al ya aplicado en el numeral 3.
 - Filtro rociador
 - Reactor de lodos activados, remoción DBO
 - Reactor de lodos activados, remoción de fósforo
 - Reactor de lodos activados, remoción nitrógeno
 - Espesado de lodo
 - Digestión aerobia

- Digestión anaerobia
- Desaguado de lodo

En los casos en que la calidad del agua residual influente a la PTAR "n" tiene una variación superior al 20%, hacia arriba o hacia abajo, se procedió a aplicar un ajuste adicional al costo de inversión en las operaciones y procesos del listado inmediato previo.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual influente es $\approx 30\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.05 o 0.90, según corresponda.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual es $\approx 40\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.12 o 0.80, según corresponda.

5. Se aplicó un factor de ponderación para los casos en que la actividad propuesta no es una unidad de proceso nueva y completa, es decir que consiste en la rehabilitación, mejoramiento o complemento de capacidad de una etapa de proceso o unidad existente.

El valor del factor de ponderación asignado en estos casos está en el rango de 0.35 a 0.65, a criterio del especialista, en función del grado de intervención que se requiere para la unidad de proceso en cuestión.

En términos generales, los valores cercanos al límite inferior del rango se aplicaron cuando la acción implicaba rehabilitación civil única o principalmente; los valores cercanos al límite superior se aplicaron cuando la intervención implica también reequipamiento electromecánico.

6. Una vez establecido el importe de inversión por planta de las principales unidades del tren de tratamiento de agua y de lodos, para determinar el importe de otros componentes de la PTAR a dicho importe se aplicó un valor seleccionado de los rangos de porcentaje que a continuación se indican:

Equipo menor:	5 % a 8 %
Vialidades, patios y obras exteriores:	1 % a 5 %
Obra eléctrica:	10 % a 15 %
Automatización y control:	3 % a 5 %
Imprevistos y contingencias:	8 % a 12 %

7. El importe por elaboración del proyecto ejecutivo de las acciones propuestas por planta se determinó a partir de un porcentaje, en el rango del 1.2 % al 3.5 %, mismo que se aplicó

sobre el importe total estimado.

8. El costo de la supervisión de la ejecución y puesta en marcha de las obras y equipamiento propuestas en el Plan de Acciones por planta, se estableció aplicando un porcentaje del 3.5 % sobre el importe total estimado, sin incluir los importes correspondientes al costo del proyecto ejecutivo y de capacitación.

Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares

La selección de la digestión anaerobia como proceso de tratamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, orientado a la generación de biogás para su aprovechamiento, o bien la opción de instalar paneles solares en estas plantas, ha sido justificada mediante criterios técnicos específicos. Estos criterios incluyen la capacidad operativa de las plantas, la disponibilidad de espacio físico y las propiedades de la carga orgánica influente. En particular, en el caso de las PTAR ubicadas en el Estado de Quintana Roo, el contexto local en que se encuentra cada planta cobra especial relevancia, dado que las condiciones geográficas, ambientales y de infraestructura turística pueden influir en la viabilidad y eficiencia de cada tecnología implementada.

Este análisis permite una decisión fundamentada, buscando optimizar tanto el rendimiento energético como el aprovechamiento sostenible de los recursos locales.

Antecedentes

Como parte del diagnóstico para el mejoramiento de las PTAR de Quintana Roo mayores a 100 L/s, la digestión anaerobia se considera en las siguientes PTAR:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur que recibe también los lodos de la PTAR Caribe
4. PTAR Saas Tun Ha (a futuro, mediano plazo)

Adicionalmente, la instalación de paneles solares se considera en las siguientes PTAR, de las cuales las primeras tres son instalaciones existentes:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur
4. PTAR El Rey
5. PTAR Saas Tun Ha
6. PTAR San Miguelito
7. PTAR Bicentenario

8. PTAR Centenario

Digestión Anaerobia y Cogeneración

La digestión anaerobia es un proceso biológico mediante el cual los lodos residuales se descomponen en ausencia de oxígeno, generando biogás. El biogás, compuesto principalmente de metano, puede ser aprovechado para producir electricidad y calor mediante sistemas de cogeneración. Además de reducir el volumen de lodos, la digestión anaerobia permite un manejo más eficiente de los residuos, mejorando la sostenibilidad de las plantas al aprovechar el potencial energético del metano.

Los principales aspectos considerados para proponer digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás en las PTAR se presentan en seguida. Todos fueron considerados en conjunto para cada planta.

Condiciones climáticas

La temperatura está relacionada con la velocidad de las reacciones químicas. En el diseño de la digestión anaerobia, la temperatura aumenta la velocidad de hidrólisis y de formación de metano, además disminuye el mínimo tiempo de retención requerido para llegar a una destrucción de sólidos aceptable (38 % en SSV).

Para un proceso mesofílico, que es el seleccionado para las PTAR de Quintana Roo, las temperaturas óptimas se encuentran entre los 30 y 38°C (Metcalf & Eddy, 2014), lo cual es fácilmente alcanzado en la región, con temperaturas de agua residual alrededor de los 30°C todo el año. El no requerir un sistema para control fino de la temperatura es una gran ventaja de toda la zona.

Carga orgánica influente

Se requiere mantener cierta carga orgánica para mantener el equilibrio entre los microorganismos que realizan la digestión anaerobia y mantener una producción de biogás constante. La carga orgánica alimentada al digestor proviene de la fracción de SSV en los lodos generados en el proceso primario y/o secundario y éstos a su vez dependen de las características del agua residual.

En general, la carga orgánica influente necesaria proviene de un análisis detallado del proceso para cada caso, sin embargo, existen lineamientos con reglas generales para anticipar este resultado. En el caso de las PTAR de Quintana Roo, se consideraron para digestión anaerobia las PTAR que en su operación actual o a capacidad plena, recibieran más de 300 L/s o carga orgánica igual o mayor a 7.5 ton DBO/d, esto de acuerdo con estudios técnicos realizados previamente por GIZ (GIZ México, 2017).

Toxicidad

La digestión anaerobia es un proceso sensible a variaciones de pH y puede verse afectada por

la presencia de ciertas sustancias inhibidoras en las aguas residuales. Para la instalación de una nueva PTAR, es fundamental realizar análisis previos para descartar la presencia de estos compuestos que puedan interferir en el proceso. En el presente caso, dado que las PTAR evaluadas ya están en operación, se ha verificado que en los sitios propuestos para la digestión anaerobia no se han registrado historiales de inhibiciones significativas al proceso biológico, lo que garantiza su viabilidad.

Volumen y tipo de lodos generados

Una de las principales ventajas de la digestión anaerobia es la generación de biogás, siendo más eficiente esta generación cuanto mayor es la carga orgánica en los sólidos alimentados. En los sitios propuestos, además de lodos secundarios, se procesan lodos primarios con alto contenido de SSV, lo que incrementa la generación de biogás. Las altas cargas orgánicas influentes a las plantas aseguran buena generación de sólidos, maximizando la eficiencia del sistema de digestión.

Disponibilidad de espacio

Los sitios con propuesta de digestión anaerobia fueron revisados para la disponibilidad de espacio para una unidad de digestión anaerobia junto con gasómetro e instalaciones de cogeneración y manejo de biogás.

Disponibilidad operativa

La digestión anaerobia es una unidad significativamente más compleja que las demás en el tren de tratamiento, lo que demanda mayor capacidad técnica y un personal operativo especializado para su correcta operación a lo largo de la vida útil de la PTAR. En las plantas propuestas, se considera que cuentan con el personal y la capacidad técnica necesarios para implementar y mantener este proceso de manera eficiente.

Viabilidad operativa

Con base en la calidad de agua, la temperatura, el caudal influente y el tipo de proceso, es posible estimar la cantidad de lodos producidos en cada PTAR. Los lodos producidos son la base para estimar el tamaño ideal del digestor anaerobio. De acuerdo con la literatura (Metcalf & Eddy, 2014) el tiempo de retención recomendado para los lodos a 30°C es de 6 a 14 días y la carga orgánica puede variar entre los 1.6 y 4.8 kg SSV/m³ d.

A manera de ejemplo, con el volumen de 5,700 m³/d y a una carga de 2.4 kg SSV/ m³ d sería posible alimentar hasta 13.7 toneladas al día de lodo. Este flujo másico a una concentración de 3.5 % en sólidos tendría un tiempo de residencia de 14.6 días. La producción de lodo actual de las PTAR seleccionadas para digestión anaerobia varía entre 6.7 y 9.9 toneladas al día, y puede ser aún mayor de acuerdo con la capacidad de tratamiento de agua residual instalada. El volumen seleccionado considera este crecimiento además de las necesidades actuales.

Conclusiones para biogás y cogeneración

Los aspectos anteriores se analizaron y forman parte del análisis de costo presentado. En general en las PTAR seleccionadas es positiva la presencia de la digestión anaerobia. En resumen, para seleccionar las PTAR donde es viable instalar digestión anaerobia se consideró que:

1. La temperatura de la zona es favorable con 30°C.
2. La carga orgánica influente a las PTAR y/o el caudal se encuentran en el umbral de 7.5 ton/d de DBO o 300 L/s de caudal tratado.
3. Los procesos biológicos existentes no presentan obstáculos por sustancias inhibidoras.
4. La presencia de lodo primario favorece la producción de biogás.
5. Existe suficiente espacio para la instalación de las unidades respectivas.
6. Existe suficiente personal operativo y capacidad técnica para mantener la unidad funcionando eficientemente.
7. El volumen seleccionado como base para los costos cubre los rangos de operación actuales y futuros de cada PTAR.
8. En el balance económico, la producción y aprovechamiento del biogás es un instrumento importante para hacer viable la operación de las PTAR más grandes.

Generación de Energía Solar

A diferencia de la digestión anaerobia, la instalación de paneles solares es un proceso más sencillo y viable para prácticamente cualquier PTAR. El criterio principal para su implementación fue la disponibilidad de espacio en la planta y su tamaño, siendo seleccionadas aquellas de mediana o gran escala.

Las plantas que no tienen suficiente carga orgánica para justificar la digestión anaerobia, pero disponen de amplias áreas, pueden aprovechar los paneles solares para reducir su dependencia de la red eléctrica y generar energía renovable de manera sostenible. En consecuencia, esta tecnología se considera para casi todas las PTAR.

El costo de implementación de ambas tecnologías no es equivalente, siendo la digestión anaerobia considerablemente más costosa. Sin embargo, como se muestra en el análisis económico, la generación de biogás a escalas superiores al umbral establecido por la GIZ produce una cantidad significativa de energía eléctrica, generando importantes ahorros a largo plazo. Además, la digestión anaerobia requiere una mayor capacidad técnica para su operación. En contraste, los paneles solares, más sencillos de instalar y mantener, representan una opción accesible y conveniente para todas las PTAR.

A continuación se presenta una tabla resumen con los principales criterios utilizados para la selección de digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás, así como para la instalación de paneles solares.

			Principales Criterios para selección de Digestión Anaerobia					Criterio de selección para la instalación de Paneles Solares	
Nombre de la planta	Capacidad instalada (L/s)	DBO entrada (mg/L)	Carga orgánica influente (Ton DBO /día)	Carga orgánica > 7.5 ton / día	Sedimentación primaria (Lodo primario)	Disponibilidad operativa	Digestión Anaerobia	Espacio disponible	Paneles solares
Pok-Ta-Pok	245	100	2.1	NO	NO	SI	NO	NO	NO

Resumen de inversión, techo financiero

En la Tabla 17 se muestra el monto de inversión por unidad de proceso o componente de proyecto, y en la Figura 26 se muestra su distribución porcentual.

Tabla 17:
Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Etapa o componente	Importe PTAR Pok Ta Pok, mdp's
Proyecto ejecutivo	2.50
Bombeo / regulación / pretratamiento / primario	38.52
Remoción DBO y nutrientes, desinfección	37.37
Tratamiento terciario	17.08
Tren de tratamiento de lodos	40.77
Digestión anaerobia	
Cogeneración	
Paneles solares	
Equipo menor	6.69
Terracerías, vialidades, patios	4.01
Obra eléctrica	16.05
Automatización y control	4.01
Imprevistos y contingencias	10.70
Supervisión	6.15

Etapa o componente	Importe PTAR Pok Ta Pok, mdp's
Capacitación	0.40
Total	184.25

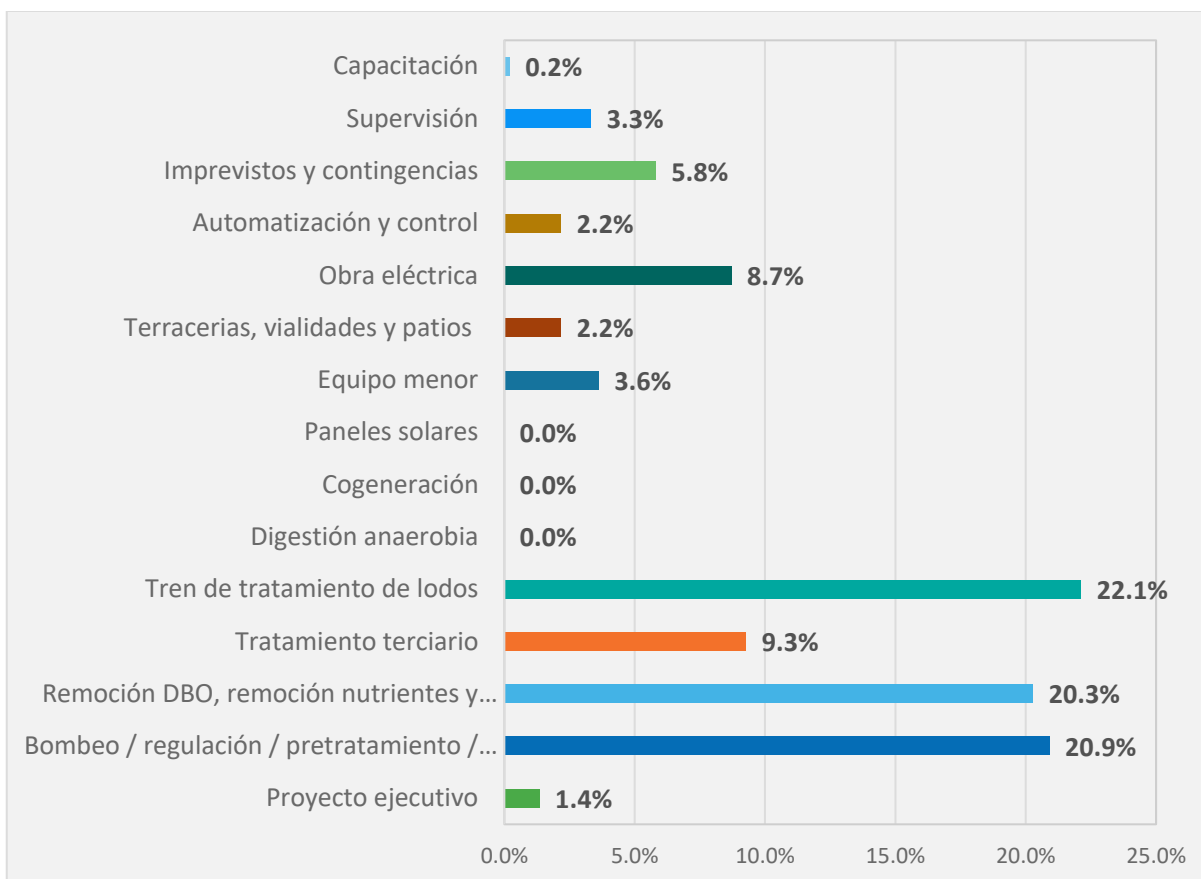


Figura 26 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

En la Tabla 18 se muestra el resumen del techo financiero total.

Tabla 18:
Monto de inversión, millones de pesos

PTAR	Capacidad instalada, L/s	Capacidad propuesta, L/s	Inversión requerida	Inversión Digestión Anaerobia	Inversión Cogeneración	Inversión Paneles solares	Inversión Total	Inversión unitaria, k\$/lps
Pok Ta Pok	245	245	184.2				184.2	752

A continuación, se muestra la estimación detallada de costos, se describe la unidad de proceso, el factor de ajuste integrado y monto de inversión estimado, así como los porcentajes aplicados a las obras complementarias: vialidades, obra eléctrica, de control e instrumentación, imprevistos, proyecto ejecutivo, supervisión y capacitación.

Tabla 19:
Estimación detallada de costos PTAR Sur

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tren de Tratamiento de Agua	Factor de ajuste	Monto en MDP
Pretratamiento mecánico		
Regulación agua cruda/pretratada	0.99	20.7
Sedimentación primaria	1.41	17.8
Caja distribuidora agua primaria		
Filtro biológico		
Biológico remoción DBO		
Biológica remoción de fósforo	0.49	11.3
Biológico remoción nitrógeno		
Clarificación secundaria	0.70	4.1
Recirculación y purga de lodo	0.49	7.3
Filtración terciaria	1.06	7.3
Desinfección	1.41	17.1
Pozos de infiltración	0.70	7.4
Tren de Tratamiento de Lodo		
Espesado		
Digestión aerobia	0.99	7.7

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Digestión anaerobia	0.99	15.9
Tanque de lodo digerido		
Desaguado		
Cogeneración	0.99	17.2
Subtotal		
Equipo menor		133.74
Terracerías, vialidades y patios	5.0%	6.69
Obra eléctrica	3.0%	4.01
Automatización y control	12.0%	16.05
Imprevistos y contingencias	3.0%	4.01
Proyecto ejecutivo	8.0%	10.70
Supervisión		2.50
Capacitación		6.15
Total		0.40

A decorative graphic consisting of three wavy, horizontal lines in blue, green, and grey, located on the left side of the page above the main title.

4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Este programa de inversiones es el resultado de las acciones propuestas para mejorar la calidad del agua tratada de las PTAR con capacidad de tratamiento igual o mayor a 100 l/s en el estado de Quintana Roo, así como el presupuesto derivado del plan de acciones. La programación de las inversiones se basa en las necesidades propias de cada planta considerando el objetivo principal, que es el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

El 5 de diciembre de 2022 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación los:

LINEAMIENTOS que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Los Lineamientos constan en total de veintitrés artículos, más un artículo transitorio, así como el denominado Anexo A: Instructivo para la Información Requerida en el Sistema.

Los Lineamientos están estructurados en seis capítulos:

- Capítulo Primero, Disposiciones Generales
- Capítulo Segundo, Requisitos para la Presentación y Registro de los Programas para el Cumplimiento
- Capítulo Tercero, De los Plazos de los Programas para el Cumplimiento

- Capítulo Cuarto, Procedimiento para la presentación, registro y revisión de los Programas para el Cumplimiento, así como del Informe de Avances
- Capítulo Quinto, De las Verificaciones
- Capítulo Sexto, De las Sanciones

Aspectos Clave de los Lineamientos

Artículo 2. Sujeto Regulado: El responsable de descargas de aguas residuales al que resulte aplicable la NOM-001-SEMARNAT-2021, quien podrá presentar sus Programas para el Cumplimiento ante la Comisión.

Artículo 5. La presentación del Programa para el Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, **es de naturaleza voluntaria**, por lo que, en caso de su incumplimiento, el responsable de la descarga de aguas residuales en cualquier cuerpo receptor propiedad de la nación, quedará sujeto a los plazos establecidos en la mencionada Norma Oficial Mexicana

Artículo 6. El Sujeto Regulado presentará su Programa para el Cumplimiento, en los siguientes supuestos:

- a) Cuando **deba modificar sus instalaciones** con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como el Apéndice Normativo de la NOM-001-SEMARNAT-2021, y que los ajustes y acciones que se deban ejecutar de acuerdo a los estudios realizados por dicho Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor, en el Artículo 2o Transitorio de la NOM, o bien,
- b) Que el Sujeto Regulado **deba modificar los procesos productivos de las actividades que generan la descarga de aguas residuales**, con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como al Apéndice Normativo y que dichas modificaciones, de acuerdo con los análisis o la evidencia del Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor.

Artículo 7. El Sujeto Regulado, en caso de presentar el Programa para el Cumplimiento lo hará por cada uno de los puntos autorizados en su Permiso de Descarga, y que, para cumplir con las disposiciones establecidas en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se ubiquen en alguno de los supuestos establecidos en el Artículo 6 de los Lineamientos.

Artículo 8. Una vez registrado el Programa para el Cumplimiento, y en tanto este se encuentre vigente, en concordancia con el Artículo 5º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, el Sujeto Regulado deberá cumplir, además de lo comprometido en el Programa, con los límites y parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, para gozar de los beneficios e incentivos que para tales efectos establezca la LFD vigente.

Artículo 10. El Programa para el Cumplimiento, contendrá:

- Nombre, denominación o razón social del Sujeto Regulado;
- RFC del Sujeto Regulado;
- Datos de identificación del Permiso de Descarga; Volumen de descarga; Datos del medidor o dispositivo de medición de las aguas residuales descargadas; Coordenadas del punto de descarga;
- Datos generales del representante legal; Correo electrónico;
- Justificación de la solicitud para la aplicación del Programa para el Cumplimiento;
- Cronograma de actividades para las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento; Periodo solicitado;
- E-Firma del Sujeto Regulado o representante legal.

Artículo 12. Los Programas para el Cumplimiento deberán presentarse ante la CONAGUA, por el Sujeto Regulado **a partir de que entre en vigor la NOM-001-SEMARNAT-2021 y hasta el 3 de abril del 2023.**

El Sujeto Regulado que no presente su Programa para el Cumplimiento en el periodo señalado, se sujetará a los plazos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 13. Los plazos que se establezcan en el Cronograma de Actividades para el seguimiento de las acciones comprometidas en los Programas para el Cumplimiento **no deberán rebasar el 11 de marzo de 2027.**

Artículo 15. La CONAGUA realizará revisiones aleatorias a los Programas para el Cumplimiento, podrá solicitar al Sujeto Regulado, las aclaraciones o información adicional que considere necesarias. En el supuesto de que el Sujeto Regulado no atienda el requerimiento de información dentro de los veinte días hábiles siguientes, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y será aplicable lo establecido en el Artículo 2º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 16. Una vez registrado el Programa ante la CONAGUA, no será objeto de modificación, salvo en el caso que el Sujeto Regulado justifique la necesidad de realizar algún cambio y no exceda el plazo originalmente establecido.

Artículo 17. El Sujeto Regulado debe presentar **dentro de los primeros cinco días hábiles de los meses de marzo y septiembre de cada año**, a partir de la fecha del registro, el avance de actividades mediante la carga de información que solicite el Sistema de Gestión en el apartado correspondiente al Informe de Avance del Programa para el Cumplimiento. Cuando el Sujeto Regulado no envíe en tiempo y forma la información del Informe de Avance, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y se aplicarán las disposiciones de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 21. La CONAGUA procederá a cancelar el Programa para el Cumplimiento y su

registro, cuando compruebe que el Sujeto Regulado no ha cumplido con lo comprometido en el programa registrado. La CONAGUA, procederá a notificar la cancelación del Programa, por lo que quedarán sin efectos las acciones de cumplimiento propuestas por el Sujeto Regulado en su respectivo Programa, aplicándose las disposiciones correspondientes de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 22. Cuando las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento presentado impliquen la suspensión de sus procesos productivos y actividades para llevar a cabo las acciones tendientes a la conversión de procesos productivos o la instalación de maquinaria, equipos o plantas que se requieran para el cumplimiento de los parámetros y límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, y deba quedar fuera de operación el sistema de tratamiento de aguas residuales, el Sujeto Regulado deberá dar aviso a la CONAGUA, al menos 30 días hábiles antes de que esto ocurra, e indicar el periodo por el que prevalecerá dicha situación, el cual **no deberá exceder de tres meses**, y podrá presentarse **hasta un máximo de dos ocasiones** durante la vigencia del Programa.

De llevar a cabo la suspensión de sus procesos de tratamiento de aguas residuales sin el aviso correspondiente se aplicarán las sanciones previstas. Una vez recibida la solicitud, el Sistema de Gestión emitirá el comprobante que acreditará que la solicitud fue hecha en tiempo y forma.

Artículo 23. En caso de incumplimiento a los compromisos establecidos en el Programa para el Cumplimiento, quedan sin efecto las prerrogativas que ampara dicho documento, por lo cual el Sujeto Regulado será acreedor a las sanciones que correspondan y, en su caso, estará obligado a efectuar el pago de los derechos por el uso y aprovechamiento de cuerpos receptores de descargas de aguas residuales propiedad de la nación, a partir de la fecha del incumplimiento, así como de aquéllos que se hubieren generado con anterioridad, con sus accesorios, conforme a la LFD vigente.

Programa de inversión anual

Como se mencionó anteriormente, el monto de inversión total del Plan de Acciones es de 184.25 millones de pesos (mdp), inversión a realizarse en 5 años a partir del año 2023 hasta marzo del 2027, acorde al plazo previsto en los Lineamiento que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el presente apartado se muestra el desglose anual del Plan de Acciones, donde se describe el monto de inversión por año y unidad de proceso y/o componente del proyecto programado, así como los importes anuales y acumulados y su porcentaje de participación en la inversión.

Tabla 20:
Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
A	Proyecto ejecutivo	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50
		100.0 %	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
B	Cárcamo, regulación, pretratamiento, y/o tratamiento primario	0.00	25.04	13.48	0.00	0.00	38.52
		0.0%	65.0%	35.0%	0.0%	0.0%	100.0%
C	Tren de tratamiento de agua	28.03	9.34	0.00	0.00	0.00	37.37
		75.0%	25.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
D	Tratamiento terciario	0.00	0.00	0.00	17.08	0.00	17.08
		0.0%	0.0%	0.0%	100.0 %	0.0%	100.0%
E	Tren de tratamiento de lodos	0.00	14.27	26.50	0.00	0.00	40.77
		0.0%	35.0%	65.0%	0.0%	0.0%	100.0%
F	Cogeneración (y/o paneles solares)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
G	Equipo menor	1.50	2.39	1.96	0.84	0.00	6.69
		22.4%	35.7%	29.3%	12.5%	0.0%	100.0%
H	Terracerías, vialidades y patios	0.90	1.43	1.18	0.50	0.00	4.01
		22.4%	35.7%	29.3%	12.5%	0.0%	100.0%
I	Obra eléctrica	3.60	5.73	4.71	2.01	0.00	16.05
		22.4%	35.7%	29.3%	12.5%	0.0%	100.0%
J	Automatización	0.90	1.43	1.18	0.50	0.00	4.01
		22.4%	35.7%	29.3%	12.5%	0.0%	100.0%
K	Imprevistos y contingencias	2.40	3.82	3.14	1.34	0.00	10.70
		22.4%	35.7%	29.3%	12.5%	0.0%	100.0%
L	Supervisión	1.38	2.19	1.80	0.77	0.00	6.15
		22.4%	35.7%	29.3%	12.5%	0.0%	100.0%
M	Capacitación	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.40
		0.0%	50.0%	50.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	Total Anual y Gran total, mdp's	41.19	65.85	54.15	23.05	0.00	184.25
	Acumulado anual, mdp's	41.19	107.05	161.20	184.25	184.25	
	Total Anual y Gran total, %	22.4%	35.7%	29.4%	12.5%	0.0%	100%
	Acumulado anual, %	22.4%	58.1%	87.5%	100%	100.0%	

A continuación, se muestra de manera gráfica el monto de inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR:

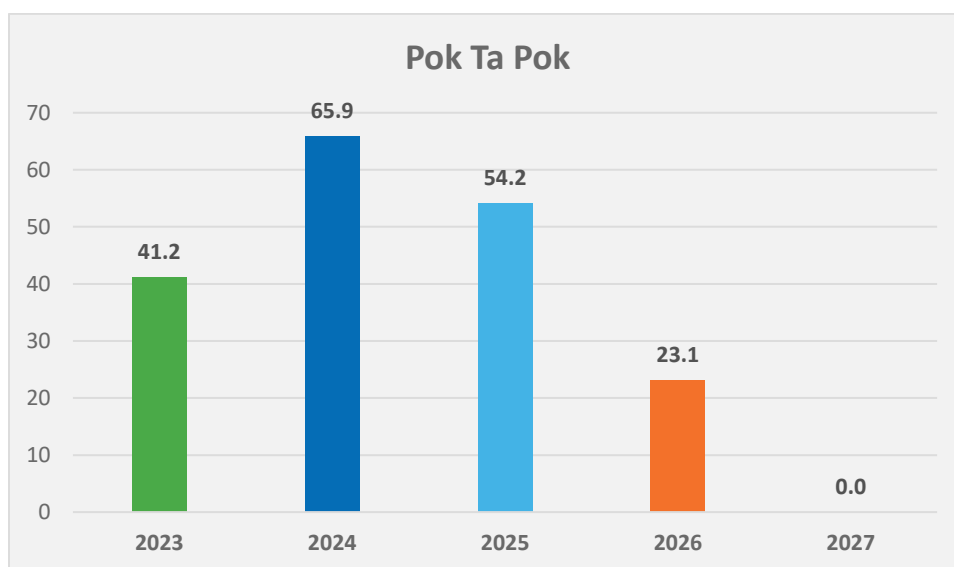


Figura 27 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Bibliografía

- CONAGUA. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. . México: CONAGUA.
- GIZ, C. A. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Mexico: GIZ.
- Metcalf & Eddy / AECOM. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. NY: McGraw-Hill.
- Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4a ed.). Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.

Diagnóstico y Plan de Acción PTAR Norte

Contenido

PTAR Norte	1
Contenido	4
Índice de Tablas	5
Índice de Figuras.....	7
1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más	8
Descripción general de la PTAR Norte.....	8
Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases	9
Descripción general del proceso	9
Diagrama de flujo del proceso	11
Descripción de las unidades de proceso	12
Tren de Tratamiento de Agua	12
Tren de Tratamiento de Lodos	20
Estado de conservación y operación de las instalaciones.....	25
Análisis de calidad del agua cruda.....	27
Calidad de agua cruda, histórica	27
Calidad de agua cruda, de este Estudio	28
Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada.....	31
Calidad de agua tratada, histórica.....	31
Calidad de agua tratada, de este Estudio.....	32
Parámetros de operación del reactor de lodos activados	35
Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua	

.....	38
Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR	39
Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) reportados por el Organismo Operador	40
Estimación de los costos de operación y mantenimiento	41
Observaciones y recomendaciones generales	45
2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	46
3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021	51
Techo financiero	51
Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales	53
Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares	57
Resumen de inversión, techo financiero	61
4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	66
Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	66
Aspectos Clave de los Lineamientos	67
Programa de inversión anual	70
Bibliografía.....	75

Índice de Tablas

Tabla 1: Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR Norte	13
Tabla 2: Dimensiones Clarificador Secundario PTAR Norte	13
Tabla 3: Dimensiones Tanque de Contacto de Cloro PTAR Norte	14
Tabla 4: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua.....	19

Tabla 5: Dimensiones de Digestor PTAR Norte	20
Tabla 6: Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo	22
Tabla 7: Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)	28
Tabla 8: Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente	30
Tabla 9: Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)	31
Tabla 10: Caracterización del agua tratada de este Estudio (<i>E.coli</i> y Huevos de helminto)	34
Tabla 11: Cumplimiento del agua tratada	35
Tabla 12: Oxígeno disuelto en reactor de lodos activados de la PTAR Norte	36
Tabla 13: Sólidos suspendidos en el licor mezclado en reactores de lodos activados de la PTAR Norte	37
Tabla 14: Ubicación de pozos de infiltración PTAR Norte	38
Tabla 15: Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales	42
Tabla 16: Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M.	43
Tabla 17: Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Norte I	46
Tabla 18: Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Norte I	48
Tabla 19: Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad media de 150 L/s	52
Tabla 20: Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	61
Tabla 21: Monto de inversión, millones de pesos.....	63
Tabla 22: Estimación detallada de costos PTAR Norte I.....	63
Tabla 23: Estimación detallada de costos PTAR Norte II.....	64
Tabla 24: Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado Norte I.....	70
Tabla 25: Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado Norte II.....	72

Índice de Figuras

Figura 1 Vista Aérea PTAR Norte	8
Figura 2 Diagrama de Flujo de Proceso Actual PTAR Norte	11
Figura 3 Ingreso de Agua Cruda y Plataforma de Pretratamiento	15
Figura 4 Cribado Grueso Manual y Mecánico	15
Figura 5 Canal Desarenador con Puente Móvil	15
Figura 6 Canal Parshall y Filtro Rociador	16
Figura 7 Cárcamo de Elevación de Filtro Rociador, Zona 1 (izquierda) y 2 (derecha).	16
Figura 8 Reactor de Lodos Activados y Tubería Influyente Reactor	16
Figura 9 Clarificador Secundario	17
Figura 10 Tanque de Contacto de Cloro y Caseta de Dosificación de Cloro	17
Figura 11 Lavador de Gases (Scrubber) y Batería de Bombas de Servicio	17
Figura 12 Mesa de Espesado de Lodos y Digestor Aerobio de Lodos	21
Figura 13 Tanque de Almacenamiento de Lodos y Filtro Banda.....	21
Figura 14 Caracterización del agua cruda (sep-2020)	30
Figura 15 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)	32
Figura 16 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)	33
Figura 17 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)	34
Figura 18 Recolección de muestra para SS – PTAR Norte	36
Figura 19 Pozos de infiltración PTAR Norte.....	39
Figura 20 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m ³	44
Figura 21 Diagrama de flujo de la PTAR Norte I con las acciones propuestas	50
Figura 22 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	62
Figura 23 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto	74

1 Diagnóstico General del Estado Físico y Operativo de las PTAR con capacidad instalada de 100 l.p.s. o más

Descripción general de la PTAR Norte

La PTAR Norte se ubica en dentro de Cancún en el municipio de Benito Juárez, y proporciona saneamiento a las aguas residuales domésticas de una parte de la zona urbana de Cancún. Aguakan es responsable de la operación y mantenimiento de la PTAR, así como del fondeo y/o obtención de los recursos económicos requeridos para su ampliación, modernización, rehabilitación y sustitución de equipos. En la Figura 1 se presenta la vista general satelital de la PTAR Norte.



Figura 1 Vista Aérea PTAR Norte

Procesos y operaciones unitarias que conforman los trenes de tratamiento de agua residual, lodo y gases

La PTAR Norte se construyó en el año 1999 para comenzar operaciones en el año 2000. Tiene capacidad nominal para tratar en promedio de 350 L/s de agua residual. Para lo cual, acorde con su capacidad, en 2021 recibió un caudal promedio de 292 L/s. La PTAR Norte se integra por diversos procesos mencionados a continuación, se agrega entre paréntesis el número de unidades de cada uno:

Tren de tratamiento de agua:

- + Plataforma de Pretratamiento: Cribado grueso manual (4), cribado fino mecánico (2) y desarenador con canal horizontal (2), compactador de sólidos (1), clasificador de arenas (1)
- + Filtro rociador (1)
- + Reactor de lodos activados mezcla completa (2)
- + Clarificación secundaria (2)
- + Tanque de contacto de cloro con cloro gas (1)
- + Pozos de infiltración de agua tratada (12)

Tren de tratamiento de lodos:

- + Mesa de espesado (1)
- + Digestión aerobia, aireación difusa (1)
- + Tanque de lodo (2)
- + Desaguado mecánico, en filtro banda (1)

Descripción general del proceso

La PTAR Norte no cuenta con un cárcamo final dentro de sus instalaciones, en su lugar, el agua entra directamente bombeada hacia la plataforma de pretratamiento elevado. Además, también ingresa agua de pipas con desazolve de los alcantarillados. Posteriormente el agua entra al pretratamiento, compuesto de cribado grueso manual, cribado fino mecánico y desarenador horizontal.

El agua pretratada se dirige hacia un filtro rociador, el distribuidor de agua del filtro opera con un motorreductor en el centro y distribuye el agua con cuatro brazos horizontales. El agua efluente del filtro ingresa a un cárcamo de recirculación y elevación. El cárcamo tiene la función de recircular agua al filtro rociador y también de bombear agua hacia el reactor de lodos activados. En este cárcamo ingresan los retornos de agua recuperada de espesado y desaguado.

Desde el cárcamo de elevación, el agua se bombea hacia el reactor de lodos activados de mezcla completa. El reactor está diseñado para la remoción de materia carbonácea y cuenta con aireación difusa, el licor mezclado efluente se conduce hacia uno de los dos clarificadores secundarios. Del clarificador se genera la corriente de retorno de lodos hacia el reactor de lodos activados, así como la purga de lodos.

El agua clarificada se conduce hacia el tanque de contacto de cloro para su desinfección mediante cloro gas. Una fracción del agua tratada se utiliza para abastecer los servicios de la PTAR y el resto se dirige hacia alguno de los doce pozos de infiltración con que cuenta la planta. Cada pozo de infiltración cuenta con un medidor de flujo para registrar la cantidad de agua descargada, dado que algunos pozos tienen más capacidad que otros.

El lodo secundario purgado se manda hacia espesado de lodo de mesa y posteriormente al digestor aerobio. La aireación de esta unidad se realiza por aire difuso con burbuja gruesa. El lodo digerido es mandado primero a un tanque de almacenamiento de lodos para después bombearlo hacia el desaguado en filtro banda. Los lodos generados en la PTAR Norte, ya desaguados, son enviados para su secado y disposición final a la PTAR Norponiente.

Diagrama de flujo del proceso

Para facilitar la comprensión de los procesos, más adelante, en la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo simplificado del proceso actual de tratamiento de agua y lodos.

DIAGRAMA DE FLUJO PTAR NORTE

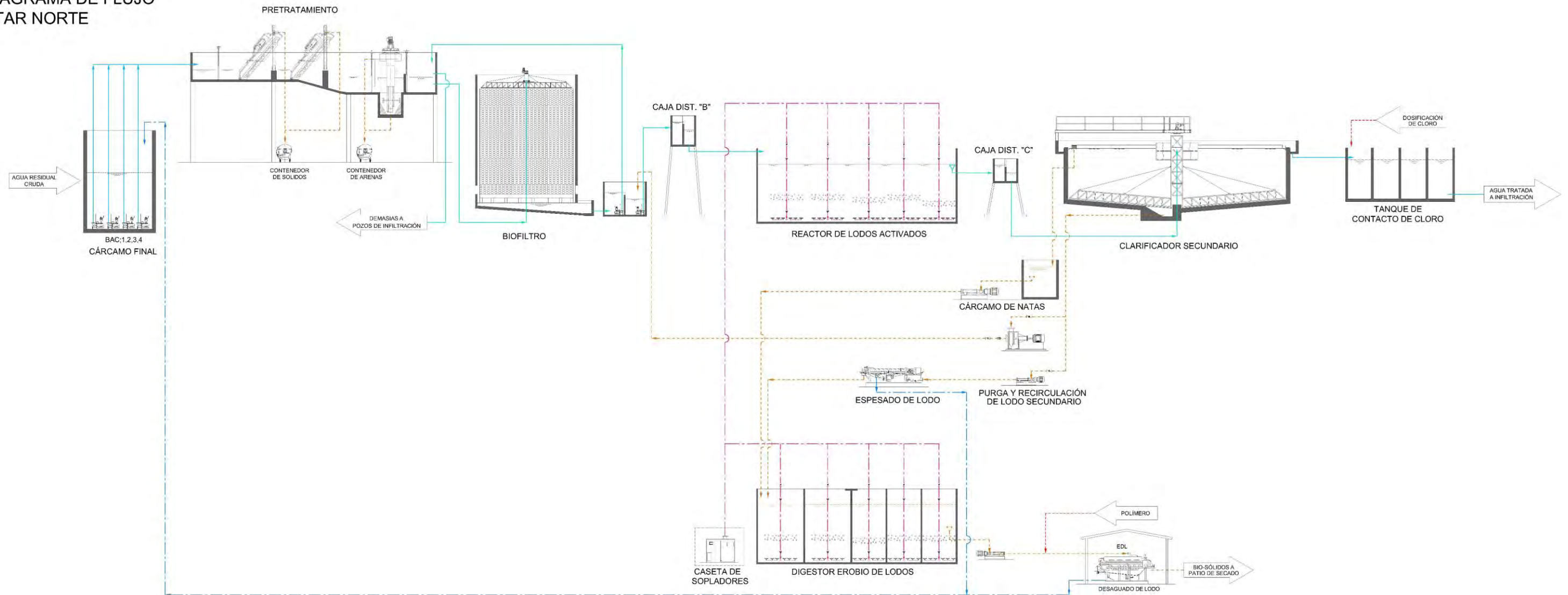


Figura 2 Diagrama de Flujo de Proceso Actual PTAR Norte

Descripción de las unidades de proceso

Como parte del trabajo de campo elaborado en este Estudio, se recopiló información sobre la condición de operación y mantenimiento de las PTAR visitadas. Más adelante, se presenta esta información para la PTAR Norte, dividido por unidad de tratamiento.

Tren de Tratamiento de Agua

Pretratamiento

El agua ingresa directamente bombeada a la plataforma de pretratamiento (Figura 3), desde cuatro cárcamos externos a la planta. La plataforma se compone de un canal con cribado grueso manual, seguido de cribado mecánico (Figura 4). El cribado grueso mecánico cuenta con un compactador de sólidos, los cuales caen directamente en un contenedor en la base de la plataforma.

Posteriormente el agua pasa a un desarenador de canal horizontal con puente móvil (Figura 5). Sobre el puente móvil se encuentra una mampara desnatadora además de la tubería para remover arenas y el panel de control del equipo. El efluente pasa por un canal Parshall para posteriormente dirigirse al filtro rociador (Figura 6). En la plataforma todos los equipos se encuentran funcionales, aunque se observa óxido en la mayoría de los soportes de equipos, cubiertas de las cribas, rieles del puente móvil del desarenador y algunos barandales.

Filtro rociador

El agua pretratada entra al filtro rociador, dentro de este se distribuye mediante cuatro brazos giratorios sobre el lecho empacado. El diámetro del filtro es de 37.0 metros y la altura de material plástico de empaque es de 2.44 metros.

El agua efluente del filtro rociador entra a un cárcamo de recirculación y elevación (Figura 7). Esta estructura se divide en dos secciones. La primera sección recibe el efluente del filtro rociador y se realiza el bombeo para la recirculación de este. El excedente de la primera sección del cárcamo rebosa por un vertedor hacia la segunda sección, la cual recibe también el retorno de agua recuperada de espesado y desaguado.

Reactores de lodos activados

Desde el cárcamo de elevación se bombea el agua y los retornos de agua hacia el reactor de lodos activados (Figura 8). El reactor se compone de dos celdas con aireación difusa y mezcla completa. El reactor cuenta con medición de oxígeno disuelto, temperatura y sólidos suspendidos totales en línea. En general se encuentran en buen estado la estructura y soportes del reactor, salvo por la conducción influente al reactor, que se observa deteriorada por el óxido.

Para abastecer de aire al reactor se cuenta con seis sopladores, de los cuales tres se encuentra fuera de servicio por mantenimiento rutinario o falla, aunque el sistema se abastece con solo uno. Las dimensiones de los reactores se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1:
Dimensiones Reactor de Lodos Activados PTAR Norte

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	2
Largo	m	36.2
Ancho	m	9.3
Tirante hidráulico	m	5
Volumen total	m ³	3,367

Clarificador secundario

El licor mezclado se dirige hacia dos clarificadores secundarios (Figura 9), desde estos se realiza la recirculación y la purga de lodo. El clarificador se encuentra en general en buenas condiciones, aunque se observan pequeñas fugas en la mampara central, que no interrumpen con la operación normal del clarificador. Las dimensiones de los clarificadores se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2:
Dimensiones Clarificador Secundario PTAR Norte

Concepto	Unidad	Valor
Diámetro	m	30
Número de unidades	No.	2
Área	m ²	1414
Tirante hidráulico, SWD	m	4

De acuerdo con el personal de operación, no se presentan problemas de operación en el clarificador secundario. En el momento de la visita se encontraba una de las bombas de recirculación de lodo fuera de operación debido a mantenimiento preventivo rutinario. Este mantenimiento fue común también para algunos sopladores de proceso, y sopladores de digestión.

Desinfección

El agua de cada clarificador se dirige hacia el tanque de contacto de cloro (Figura 10) para su desinfección con gas cloro. La caseta de dosificación es de tipo cerrada, y cuenta con detector de fugas de cloro, además de un kit B para el control de fugas y un lavador de gases scrubber (Figura 10). No se reportan obstáculos o problemas de operación en esta unidad y cumple con las medidas de seguridad requeridas para el manejo de cloro. Las dimensiones del tanque de contacto de cloro de muestran en la Tabla 3.

Tabla 3:
Dimensiones Tanque de Contacto de Cloro PTAR Norte

Concepto	Unidad	Valor
Volumen	m ³	690
Canales	No.	8
Largo – ancho canal - tirante	m	15.0 – 2.3 – 2.5

Disposición y aprovechamiento de agua tratada

Del tanque de contacto de cloro el agua tratada se dirige a alguno de los doce pozos de infiltración. No existe aprovechamiento de agua para reúso por lo que toda el agua se dirige a infiltración. Además, cada pozo cuenta con un medidor de flujo para registrar el caudal ingresado a este.

Vistas del tren de tratamiento de agua

De la Figura 3 a la Figura 11 se muestran las diferentes unidades del tren de tratamiento de agua de la PTAR.



Figura 3 Ingreso de Agua Cruda y Plataforma de Pretratamiento



Figura 4 Cribado Grueso Manual y Mecánico



Figura 5 Canal Desarenador con Puente Móvil



Figura 6 Canal Parshall y Filtro Rociador



Figura 7 Cárcamo de Elevación de Filtro Rociador, Zona 1 (izquierda) y 2 (derecha).



Figura 8 Reactor de Lodos Activados y Tubería Influyente Reactor



Figura 9 Clarificador Secundario



Figura 10 Tanque de Contacto de Cloro y Caseta de Dosificación de Cloro



Figura 11 Lavador de Gases (Scrubber) y Batería de Bombas de Servicio

Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras y equipos existentes del tren de agua

Con el fin de verificar que las principales estructuras de proceso del tren de tratamiento de agua sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes en el agua cruda, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para tal efecto se utilizaron las dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior, los datos de caudal y calidad de agua cruda utilizados son los siguientes:

- + Caudal medio de diseño 350 L/s
- + Calidad de agua cruda promedio (histórico)
 - DBO, 233 mg/L
 - SST, 216 mg/L

En la Tabla 4 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de agua, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR Norte con las dimensiones de las estructuras, en caso de no contar con algún dato de operación se asignó un valor promedio del rango típico.

Los rangos especificados para el filtro biológico aplican para procesos duales, con filtro de desbaste seguido de un proceso de lodos activados, en este caso de mezcla completa.

Tabla 4:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de agua

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Norte
Filtro biológico			
Caudal medio que ingresa al FR	L/s	No aplica	350
Carga orgánica volumétrica	kg/m ³ -d	1.6 – 4.0	2.7
Porcentaje de remoción de DBO en FR esperado	%	40 a 70%	50%
Reactor de Lodos Activados			
Concentración de DBO influente al reactor	mg/L	No aplica	117
Concentración de SSTLM	mg/L	2,500 - 5,000	3,300
Fracción volátil		0.7 a 0.8	0.75
Relación F/M	kg/kg - d	0.2 a 0.6	0.42
Carga volumétrica	KgDBO/m ³ - d	0.3 a 1.6	1.05
Tirante hidráulico	m	4.5 a 7.5	5.0
Clarificador Secundario			
Carga hidráulica superficial, Caudal medio	m ³ /m ² -d	16 a 28	21.4
Recirculación	%	25 a 100%	100%
Carga de sólidos, Caudal medio	Kg/m ² - h	4 a 6	5.9
Tirante hidráulico	m	4 a 5	4.0
Tanque de contacto de cloro			
Tiempo hidráulico de retención	min	30	32.9

¹ Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + Los principales criterios de diseño del filtro biológico, reactor de lodos activados y tanque de contacto de cloro están dentro de los rangos típicos recomendados en la bibliografía especializada.
- + Los clarificadores secundarios fueron diseñados en el límite superior del rango de carga de sólidos recomendada por las referencias, por lo tanto el reactor no debe ser operado con concentraciones de sólidos en el licor mezclado mayores a 3,300 mg/L para no exceder la carga recomienda y mantener la eficiencia en la remoción de sólidos.

Tren de Tratamiento de Lodos

Espesado de lodo y Digestor aerobio de lodos

La purga de lodo secundario se conduce primero hacia el espesador de mesa para aumentar su concentración de sólidos, posteriormente ingresa al digestor aerobio de lodos (Figura 12). El digestor opera con aireación difusa de burbuja gruesa. Este presenta algunos problemas de fugas, pues se observa una distribución irregular de aire en la superficie del digestor, no obstante, no afectan su funcionamiento. En esta etapa el mayor deterioro se presenta también en la mesa de espesado, que presenta óxido en diversas partes. En la Tabla 5 se presentan las dimensiones de esta unidad.

Tabla 5:
Dimensiones de Digestor PTAR Norte

Concepto	Unidad	Valor
Número de unidades	No.	2
Largo	m	24
Ancho	m	12
Altura útil del tanque	m	4.9
Volumen útil	m	2,822

Desaguado de lodo y Secado

El lodo digerido se dirige hacia los tanques de almacenamiento de lodos y posteriormente al desaguado por filtro banda. Los tanques de almacenamiento solían funcionar como espesadores, pero fueron reemplazados por la mesa de espesado y ahora funcionan como unidad reguladora de

alimentación de lodo hacia el filtro banda. El lodo desaguado y generado se manda a la PTAR Norponiente. La caseta de espesado y desaguado presenta deterioro leve en los soportes y vigas, causada por el ambiente corrosivo del manejo de lodos.

Vistas del tren de tratamiento de lodo

Las Figura 12 y 13 muestran las diferentes unidades de proceso del tren de tratamiento de lodo de la PTAR.



Figura 12 Mesa de Espesado de Lodos y Digestor Aerobio de Lodos



Figura 13 Tanque de Almacenamiento de Lodos y Filtro Banda

Evaluación de los criterios de las principales estructuras y equipos existentes del tren de lodo

Con el fin de verificar que las principales estructuras y equipos de proceso del tren de tratamiento de lodo sean adecuadas para el caudal de diseño y carga de contaminantes, se efectuó la evaluación de los parámetros de diseño más relevantes, tomando como referencia los rangos típicos indicados en la bibliografía especializada.

Para esta evaluación se consideraron las siguientes premisas de cálculo:

- + Dimensiones de las unidades de proceso presentadas en el apartado anterior.
- + Producción de lodos, se estimó con base en la fórmula simplificada de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) con los datos de caudal medio de diseño y calidad de agua cruda promedio del histórico (SST y DBO), mismos que se utilizaron para la evaluación del tren de agua (US EPA, 1993).
- + Para determinar el volumen de lodos se utilizaron las concentraciones típicas esperadas en la purga de lodo secundario.
- + De manera conservadora, se consideró que los equipos mecánicos de espesado y desaguado operan 5 días por semana 16 horas por día.
- + En la Tabla 6 se presentan los principales criterios de diseño de cada unidad de proceso del tren de lodo, el rango típico especificado en la bibliografía y el valor calculado para la PTAR Norte con las dimensiones de las estructuras y capacidades de equipos, en caso de no contar con algún dato de operación se consideró un valor promedio del rango típico.

Tabla 6:
Evaluación de los criterios de diseño de las principales estructuras del tren de tratamiento de lodo

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Norte
Producción de lodo			
Producción de lodo esperada	kg SST /día	No aplica	6,110
Concentración		0.5 a 1.5%	0.70%
Flujo volumétrico	m ³ /día	No aplica	873
Mesa espesadora de lodo			
Ancho de banda	m	1 a 3	2
Carga de sólidos (por metro)	Kg/h	200 a 600	267

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Norte
Carga hidráulica (por metro)	L/s	6.7 - 19	10.6
Porcentaje de captura considerado		90 a 98%	95%
Concentración de lodo espesado esperada		4 a 9%	4%
Volumen de lodo espesado estimado	m ³ /día	No aplica	145
Masa de lodo espesado estimada	kg SST /día	No aplica	5,804
Digestión Aerobia de lodo			
Carga de sólidos volátiles	kgSSV/m ³ -d	1.6 a 4.8	1.6
Tiempo de retención hidráulico (edad de lodo, ≈28°C)	días	18 a 20	19.4
Destrucción esperada		38 a 50%	40%
Masa de lodo digerido estimada	kg SST /día		4,277
Desaguado de Lodo (filtro banda)		No aplica	
Ancho de banda	m	1 a 3	2
Carga de sólidos (por metro)	kg/h	250 a 410	187
Carga hidráulica (por metro)	L/min	150 a 340	106
Porcentaje de captura		90 a 98%	95%
Concentración de lodo desaguado esperada		12 a 22%	18%
Volumen de lodo desaguado estimado	m ³ /día		32.2

Concepto	Unidad	Rango típico ¹	Valor PTAR Norte
Masa de lodo desaguado estimada	kg SST/día		4,063

1 Fuente: (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014)

De la tabla anterior surgen los siguientes comentarios:

- + Los criterios de diseño del espesador, digestor aerobio y filtro banda para desaguado de lodo están dentro de los rangos típicos recomendados en la bibliografía especializada.

Estado de conservación y operación de las instalaciones

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de agua de la PTAR Caribe, evaluadas con base en el cumplimiento de la NOM-001-2021 para suelo cárstico en DQO, SST, NT y PT con el promedio histórico de calidad de agua, se clasifican de **“Regulares a Buenas”**. En la sección **Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada**, se presenta la evaluación de dicha información.

Las condiciones de operación del tren de tratamiento de lodos, determinadas con base en las condiciones operativas y de desempeño de las operaciones de espesado, digestión y desaguado observadas en la visita, se clasifican como **“Buenas”**. En términos generales las condiciones de mantenimiento de los trenes de tratamiento de agua y de lodos se consideran **“Buenas”**. En los párrafos subsecuentes se describe lo observado en la visita técnica efectuada a la PTAR.

La PTAR Norte se construyó en 1999 e inició operaciones en el 2000, por lo que cuenta con 22 años de operación. Esto se evidencia en algunas de sus estructuras y equipos todavía en funcionamiento, aunque gracias a los esfuerzos de mantenimiento la PTAR se observa en condiciones adecuadas en casi todos los aspectos. En seguimiento de las evaluaciones realizadas, para la PTAR Norte, destacan los siguientes aspectos de proceso:

- + No cuenta con una operación formal de remoción de nitrógeno ni fósforo, que debido a las características del agua residual es necesaria.
- + La operación del filtro rociador puede representar un obstáculo para la remoción de nutrientes, esto debido a la carga orgánica necesaria para remover nitrógeno y fósforo biológicamente.

En la visita de campo se observaron los siguientes aspectos relacionados con la condición de las instalaciones de la PTAR:

- + El pretratamiento funciona adecuadamente, además de contar con el ciclo completo de unidades para retención de basuras y arenas; con el cribado mecánico medio y fino, además del compactador de sólidos, el desarenador y el clasificador de arenas.
- + El filtro rociador existente se encuentra en servicio y opera adecuadamente. Se observan algunas obstrucciones en las salidas del brazo distribuidor, pero no interrumpen con el funcionamiento de la unidad.
- + El reactor de lodos secundarios y los clarificadores secundarios operan adecuadamente y cumplen con su objetivo.
- + El equipo pretratamiento compacto, no funciona con el desempeño esperado debido a fallas con diversas partes del equipo.
- + Cuenta con caseta de cloración cerrada, además de medidas de seguridad como un sensor de cloro ambiental, un kit para la reparación de fugas y un scrubber para la contención de las fugas de cloro.
- + La aireación en el digestor presenta irregularidades, probablemente debidas al taponamiento de uno o más difusores.

Con respecto al equipamiento mecánico se observa lo que a continuación se describe:

- + En general el equipo en el tren de agua se encuentra en buen estado. Condiciones adecuadas de operación y mantenimiento los equipos de bombeo de agua, de la igual manera con los sopladores de aire para proceso de lodos activados. Diversos equipos se encuentran fuera de operación por mantenimiento, aunque el número de equipos fuera no interrumpe con la operación.
- + En cuanto al tren de lodo, los equipos de mesa de espesado y desaguado de lodos presentan deterioro medio, derivado de su largo tiempo de funcionamiento.
- + La caseta de desaguado de lodo presenta también problemas de corrosión leve en los polines de soporte del techo.
- + Se cuenta con un programa de mantenimiento preventivo de todos los equipos, lo que fortalece la seguridad del sistema para mantener la misma capacidad de tratamiento.

La obra e instalaciones eléctricas, como son la subestación, el Centro de Control de Motores, red de fuerza y alumbrado exterior se observan en condiciones regulares de mantenimiento. De igual manera, por su tiempo de funcionamiento presentan deterioro y la mayoría de los equipos no cuentan con protecciones.

La planeación para dar cumplimiento a la NOM-001-SEMANARNAT-2021 en la PTAR Norte requerirá de la elaboración de un proyecto ejecutivo. De manera general, deberá tomar en cuenta el mantenimiento general de la mayoría de las estructuras de la planta, la construcción de nuevas unidades de proceso y suprimir otras (como el filtro rociador), así como la renovación de diversos equipos que cuentan ya con un largo tiempo de operación y no se puede asegurar su desempeño eficiente.

En el Anexo 1 (Ficha de la PTAR) se presenta la descripción detallada de las características y condiciones actuales de operación y mantenimiento de las estructuras y equipos del tren de agua y lodos.

Análisis de calidad del agua cruda

Calidad de agua cruda, histórica

Se incluyen diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos, la información fue proporcionada por Aguakan, los análisis fueron efectuados por el laboratorio interno del organismo operador. Los datos de calidad de agua cruda y tratada proporcionados por el organismo operador se encuentran en el apartado Bases de Datos.

Los parámetros incluidos en las bases de datos de Aguakan son los siguientes:

- + Temperatura
- + pH: Potencial de hidrógeno
- + Conductividad
- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos sedimentables
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Sólidos suspendidos volátiles (SSV)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂) (efluente)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃) (efluente)
- + Nitrógeno amoniacal (N-NH₃)
- + Nitrógeno total (NT) (efluente)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)
- + Fósforo total (PT)
- + Coliformes fecales
- + Cloro residual libre
- + Transmitancia (efluente)
- + Absorbancia (efluente)

Debido a que los resultados de los muestreos fueron previos a la actualización de la NOM-001-SEMARNAT-2021, las bases de datos no incluyen los parámetros adicionales de la nueva norma, como color verdadero, toxicidad y *E. Coli*, así mismo incluyen parámetros que no son objeto de estudio en la actual norma, sin embargo, si permiten determinar la calidad de los procesos de tratamiento del agua residual.

Se proporcionaron datos de 195 muestreos efectuados en el influente durante el periodo del año 2020 al 2021 de tipo compuesto.

A continuación se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Norte.

Tabla 7:
Análisis estadístico agua cruda (2020-2021)

Concepto	Q prom. L/s	pH	SST mg/L	SSV mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	G & A mg/L	NTK mg/L	PT mg/L
No. de datos	194	195	195	195	98	195	24	97	12
Mínimo	140.8	6.9	63	35	96	281	8.0	25.43	6.36
1° cuartil	222.3	7.6	163	120	199	486	14.3	62.37	8.40
Promedio	274.4	7.7	216	162	233	563	23.0	70.38	10.13
Mediana	277.5	7.7	213	155	226	558	23.0	70.39	10.03
3° cuartil	326.4	7.8	252	193	261	631	28.8	78.22	11.28
Máximo	494.1	8.0	530	410	609	977	42.0	106.51	17.40

Calidad de agua cruda, de este Estudio

Del 19 al 20 de septiembre se efectuó un muestreo compuesto de 24 horas tanto en el influente y efluente de la PTAR Norte, este se efectuó con seis muestras simples, a cada una de estas se les realizaron los siguientes análisis de campo:

- + pH
- + Temperatura del agua
- + Cloro residual libre (efluente)

Los parámetros analizados en el laboratorio fueron los siguientes:

- + Grasas y aceites (G&A)
- + Sólidos suspendidos totales (SST)
- + Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- + Demanda química de oxígeno (DQO)
- + Nitrógeno de nitritos (NO₂)
- + Nitrógeno de nitratos (NO₃)
- + Nitrógeno total (NT)
- + Nitrógeno total de Kjeldahl (NTK)

- + Fósforo total (PT)
- + Escherichia coli (efluente)
- + Toxicidad Vibrio fischeri (efluente)
- + Huevos de helminto
- + Color verdadero (UV-Vis) a 436, 525 y 620 nm

Las actividades de colecta, preservación y análisis de las muestras fueron realizadas por personal de Laboratorios ABC Química Investigación y Análisis (Intertek + ABC Analytic), éste cuenta con la acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditamiento (EMA) en la rama de agua número AG-096-029/11 para su laboratorio ubicado en la ciudad de México y AG-096-029/11_S1 para el laboratorio de Mérida, que es donde se realizarán los análisis.

En todos los casos, la preservación y el almacenamiento de las muestras se efectuaron de acuerdo con los lineamientos que establece la normatividad mexicana. Las muestras colectadas fueron preservadas con hielo a una temperatura de 4°C con la intención de que no se degradaran, y fueron transportadas en una hielera al laboratorio correspondiente para su análisis.

El transporte se hizo con sumo cuidado, de tal forma que se evitaron los derrames y/o contaminación de muestras debido a rupturas de frascos o cualquier otro accidente.

Los diferentes frascos que integran las muestras se preservaron con los reactivos señalados en la normatividad.

En la Figura 14 se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua cruda de la PTAR Norte. En el Anexo 3 se presentan los resultados completos del laboratorio del influente y efluente de la PTAR Norte.

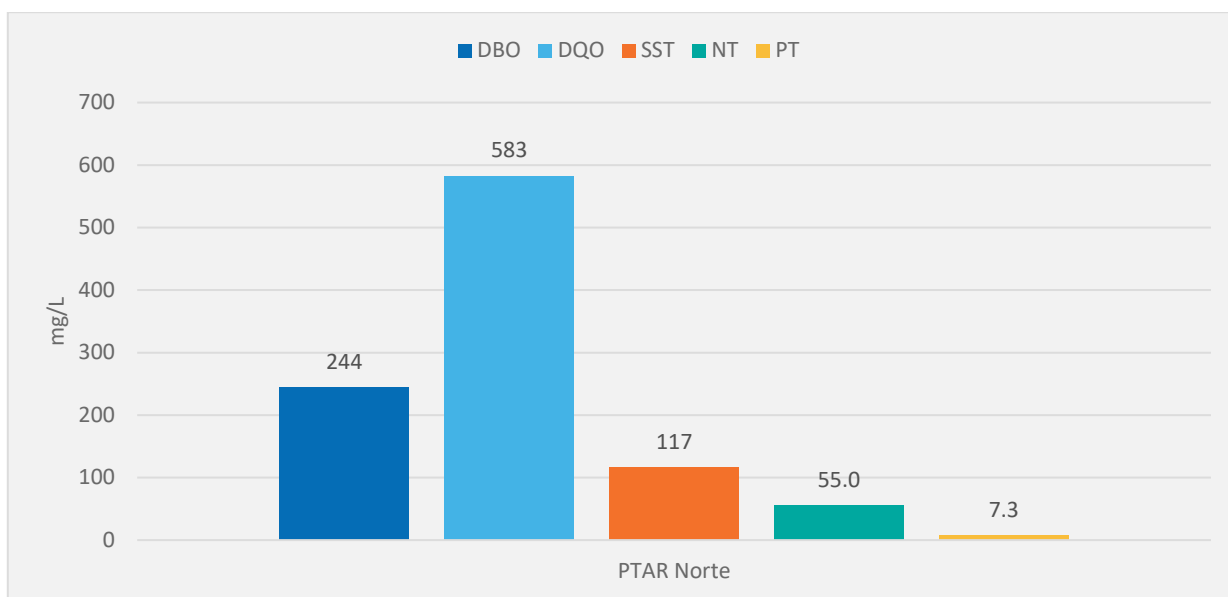


Figura 14 Caracterización del agua cruda (sep-2020)

Con la finalidad de conocer la relación de contaminantes, se realizaron los cálculos que a continuación se presentan en la siguiente tabla, los cuales fueron determinados con el valor promedio del histórico (2020-2021) y el valor obtenido en este Estudio.

Tabla 8:
Comparación de relaciones típicas entre parámetros del influente

Relación	Promedio (2020-2021)	Valor Estudio 2022	Rango típico en Aguas Residuales Municipales ¹
DBO5/ DQO	0.41	0.42	0.45 – 0.55
SST/ DBO	0.92	0.48	0.80 – 1.20
NTK/ DBO	0.30	0.22	0.10 – 0.20
Fósforo/ DBO	0.04	0.03	0.02

¹ (US EPA, 1993)

De las relaciones anteriores destaca el valor bajo de SST obtenido en este estudio en relación de la concentración de DBO. De los valores históricos se observa alta relación NTK/DBO lo cual hace más compleja la remoción de nitrógeno.

Cumplimiento de la normatividad de calidad del agua tratada

En las siguientes figuras y tablas se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada del histórico de datos proporcionados por Aguakan y de los obtenidos en el presente Estudio, en estas se presentan los límites permisibles (LP) establecidos en la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021 para suelo cárstico.

Calidad de agua tratada, histórica

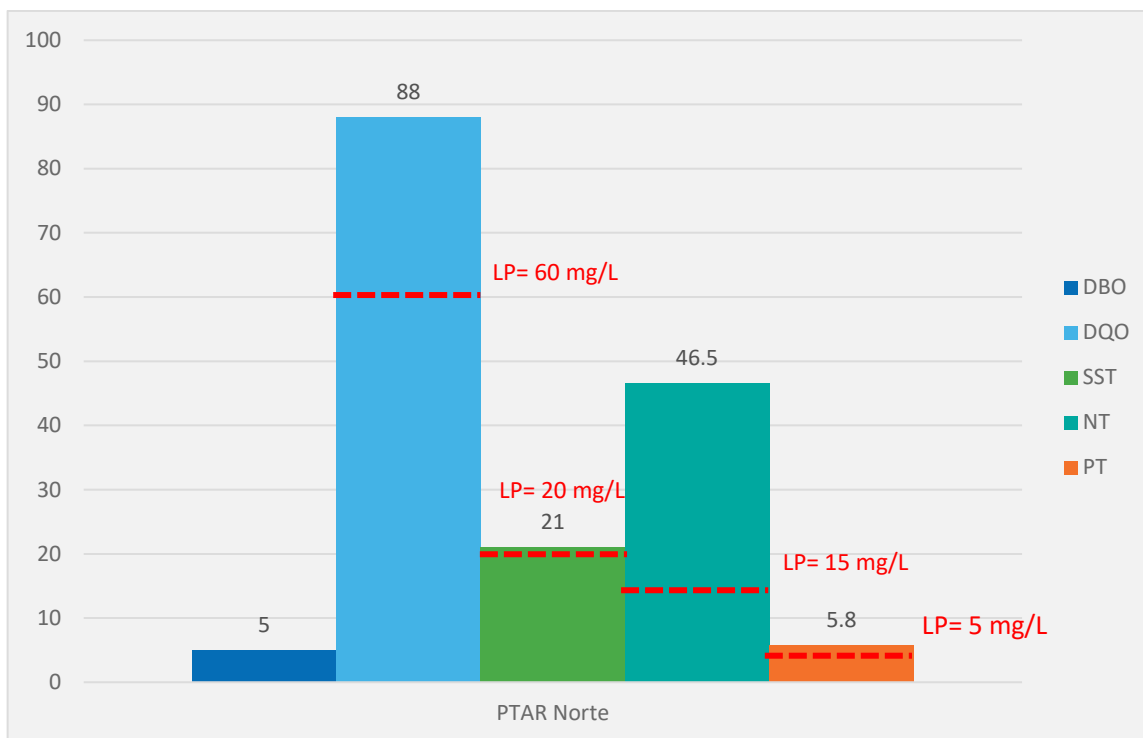
Se proporcionaron datos de 191 muestreos de tipo compuesto efectuados en el efluente durante el periodo del año 2020 al 2021.

En la siguiente tabla se presenta el análisis estadístico de los principales parámetros en el agua tratada de la PTAR Norte.

Tabla 9:
Análisis estadístico agua tratada (2020-2021)

Concepto	Q prom. L/s	SST mg/L	DBO5 mg/L	DQO mg/L	G & A mg/L	NTK mg/L	NT mg/L	Cl2 residual mg/L	PT mg/L
No. De datos	194	191	95	191	24	96	96	191	11
Mínimo	140.8	2	2	31	1.0	4.79	14.44	0.00	2.00
1° cuartil	222.3	9	2	65	2.0	37.01	40.61	0.08	3.65
Promedio	274.4	21	5	88	5.4	43.75	46.48	0.23	5.80
Mediana	277.5	14	2	77	3.5	43.61	46.27	0.19	6.07
3° cuartil	326.4	22	6	96	6.8	51.78	53.96	0.28	6.49
Máximo	494.1	235	38	345	31.0	67.69	68.41	2.20	11.10

A manera de resumen en la Figura 15 se presentan los valores promedio de los principales parámetros del agua tratada de la PTAR Norte, en esta se indican los límites permisibles (LP) para el promedio mensual en la NOM-001-2021.

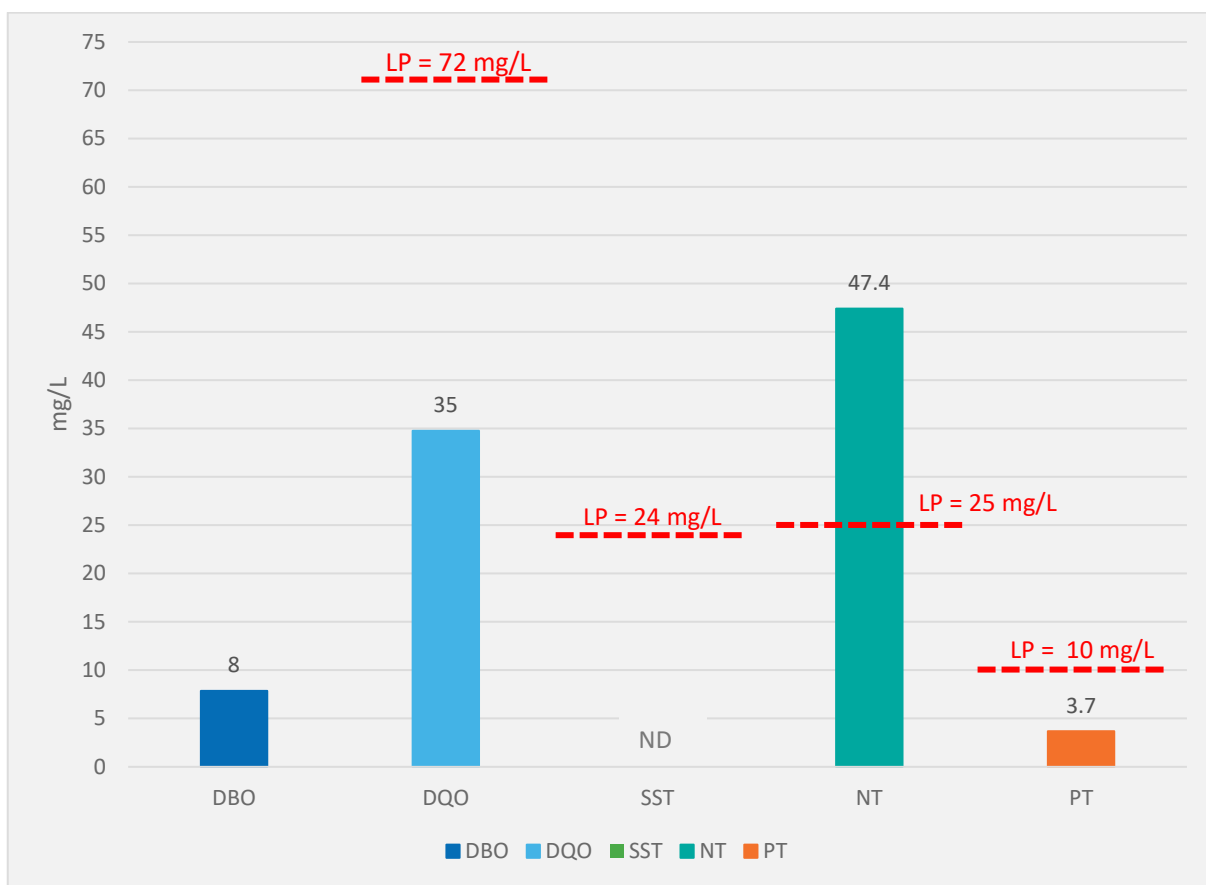


LP = Límite permisible

Figura 15 Calidad del agua tratada histórico (2020-2021)

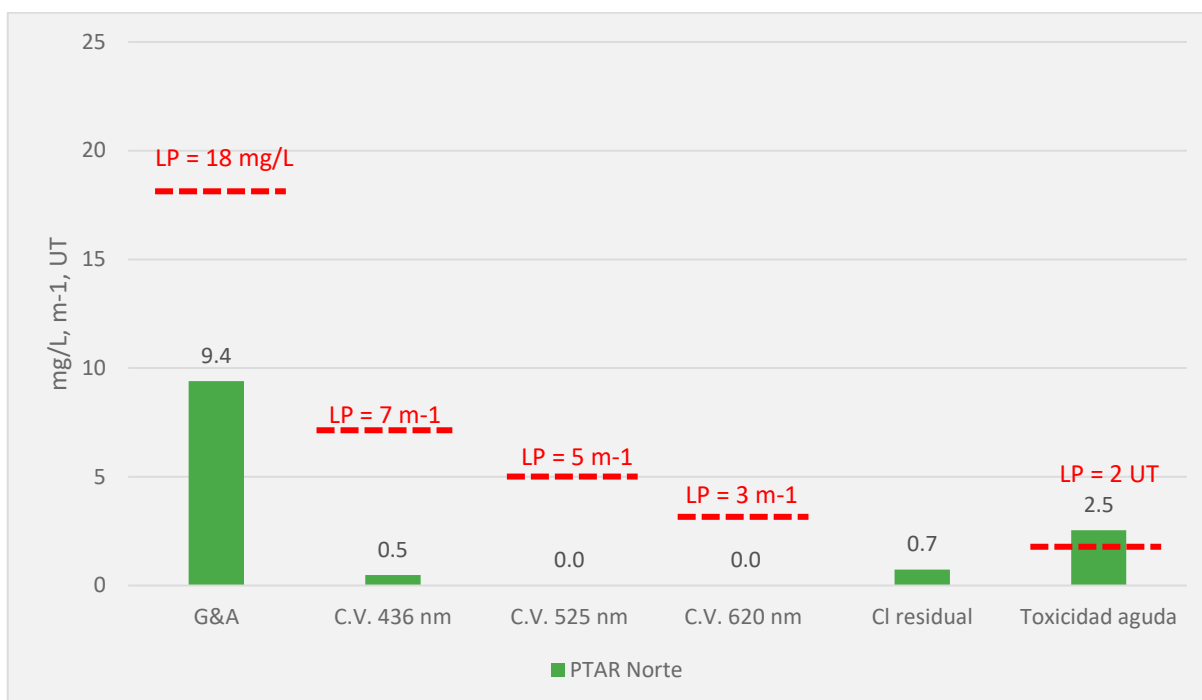
Calidad de agua tratada, de este Estudio

En la siguientes figuras y tabla se presentan los resultados de los principales parámetros analizados en el agua tratada de la PTAR Norte, en estas se indican los límites permisibles para el promedio diario en la NOM-001-2021.



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 16 Calidad del agua tratada de este Estudio (DBO, DQO, SST, NT, PT)



LP = Límite permisible, ND = No detectado

Figura 17 Caracterización del agua tratada de este Estudio (G&A, Color verdadero, Cloro residual y Toxicidad aguda)

Tabla 10:
Caracterización del agua tratada de este Estudio (*E.coli* y Huevos de helminto)

		PTAR Norte	Límite permisible NOM-001-2021
E.coli	NMP/100 mL	774	100
Huevos de helminto	HH/L	<0.2	1

Con la información histórica de calidad de agua tratada proporcionada por Aguakan y los resultados de los análisis efectuados se efectuó el análisis del cumplimiento de los principales parámetros de calidad del agua con respecto a la nueva NOM-001-SEMARNAT-2021, para los valores de los datos históricos se utilizó el límite permisible del valor promedio mensual y para los resultados de los muestreos efectuados en este estudio se utilizó el límite permisible del valor promedio diario.

Tabla 11:
Cumplimiento del agua tratada

Parámetro	Valor promedio histórico (2020-2021) (mg/L)	Valor Estudio 2022 (mg/L)	Límite permisible NOM-001-2021	Cumple
SST	21	No detectado	PM = 20 (mg/L) PD = 24 (mg/L)	NO SI
DQO	88	35	PM = 60 (mg/L) PD = 72 (mg/L)	NO SI
Nitrógeno total	46.5	47.4	PM = 15 (mg/L) PD = 25 (mg/L)	NO
Fósforo total	5.8	3.7	PM = 5 (mg/L) PD = 10 (mg/L)	NO SI

PM= Promedio mensual, PD = promedio diario.

Con respecto al color verdadero, en las tres longitudes de onda se obtuvieron valores dentro del límite permisible, la concentración de *E. Coli* y el valor de toxicidad estuvieron por encima del límite permisible, la toxicidad dió alta debido a que la muestra se tomó aguas abajo de la etapa de cloración.

Parámetros de operación del reactor de lodos activados

Como parte de los trabajos de caracterización del agua cruda y tratada de la PTAR, también se incluyó la medición de los parámetros de operación del reactor de lodos activados, oxígeno disuelto (OD) y sólidos sedimentables (SS).

Los dos reactores de la PTAR Norte cuentan con sensores de OD y sólidos suspendidos en el licor mezclado (SC-200 marcha Hach), de los cuales se tomó lectura.

Además el laboratorio también analizó en campo el OD con un equipo portátil de la marca Hach y se midieron los SS en cada reactor. Los datos obtenidos para el oxígeno disuelto se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12:
Oxígeno disuelto en reactor de lodos activados de la PTAR Norte

Equipo	Reactor 1 (mg/L)	Reactor 2 (mg/L)
Sensores SC-200/Hach	0.29	0.78
Equipo portátil Hach	0.19	0.73

El valor promedio de oxígeno disuelto de ambas mediciones es de 0.24 mg/L en el Reactor 1 y de 0.76 mg/L en el Reactor 2, el rango típico de operación es de 1 a 3 mg/L (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014), por lo cual ambos reactores se encuentran por debajo del valor recomendado, probablemente se requiera operar con más sopladores.

En cuanto a los SS se realizó la prueba con dos buretas un tiempo de 30 minutos (Figura 18), resultando 410 mL/L en el Reactor 1 y 370 mL/L en el Reactor 2, que con un índice volumétrico típico de 120 mL/g equivalen a una concentración de SSLM de 3.42 y 3.08 g/L (Tabla 13).

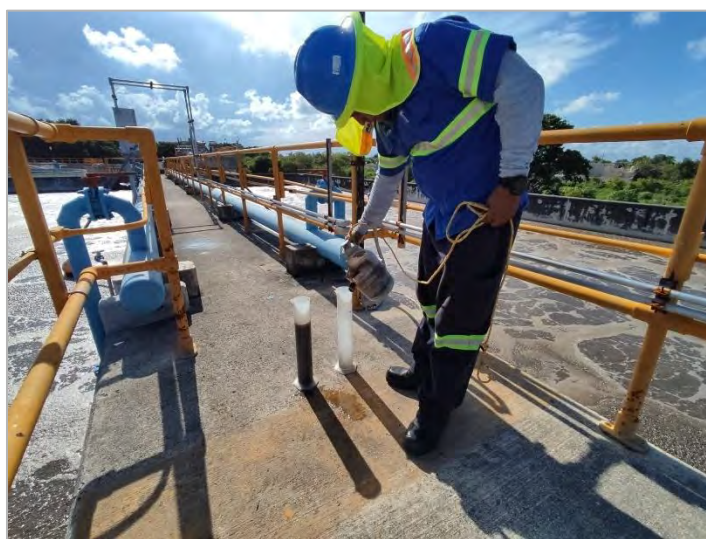


Figura 18 Recolección de muestra para SS – PTAR Norte

Tabla 13:
Sólidos suspendidos en el licor mezclado en reactores de lodos activados de la PTAR Norte

Equipo	Reactor 1 (mg/L)	Reactor 2 (mg/L)
Sensores SC-200/Hach	3,857	2,993
Buretas	3,417	3,083

Como se observa en la tabla anterior, los valores de SSLM en los reactores se encuentran dentro del rango típico para este tipo de reactores que es de 2.5 a 5.0 g/L (Metcalf & Eddy / AECOM, 2014).

Georreferenciación de las PTAR, punto de descarga de agua tratada en el cuerpo de agua

Como parte de las actividades realizadas en campo, se registraron las coordenadas de los pozos de infiltración de cada PTAR, utilizando un equipo GPS map 60Cx marca Garmin. En la Tabla 14 se presentan las coordenadas de localización de los pozos de infiltración de agua tratada de la PTAR Norte.

Posteriormente, en la Figura 19 se presentan fotografías correspondientes al levantamiento de las coordenadas con GPS y de los registros o brocales de los pozos de infiltración.

Tabla 14:
Ubicación de pozos de infiltración PTAR Norte

Concepto	Latitud	Longitud
Pozo de infiltración 1	21.204528	-86.828584
Pozo de infiltración 2	21.204668	-86.828175
Pozo de infiltración 3	21.20478	-86.82782
Pozo de infiltración 4	21.204402	-86.827801
Pozo de infiltración 5	21.20429	-86.828176
Pozo de infiltración 6	21.204174	-86.828535
Pozo de infiltración 7	21.20436	-86.829869
Pozo de infiltración 8	21.204337	-86.829966
Pozo de infiltración 9	21.204643	-86.828975
Pozo de infiltración 10	21.204515	-86.82944
Pozo de infiltración 11	21.205252	-86.828859
Pozo de infiltración 12	21.205455	-86.828401



Figura 19 Pozos de infiltración PTAR Norte

Cobertura, longitud, estado de conservación y ubicación general del sistema de drenaje que conduce las aguas residuales a la PTAR

Pendiente de incorporar, no se ha recibido la información por parte de Aguakan.

Costos reales de operación y mantenimiento (O & M) reportados por el Organismo Operador

De acuerdo a la información proporcionada por Aguakan, el costo total de O & M de la PTAR Norte en el año 2021 fue de 22.27 millones de pesos (mdp's), desagregado de la siguiente forma:

- + Costo de operación: 16.61 mdp's
- + Costo de mantenimiento: 5.67 mdp's

Considerando que el caudal medio de agua tratada en el año 2021 fue de 292 L/s, que representan un volumen anual de 9,208,512 m³, el costo unitario de O & M de la PTAR fue de 2.42 \$/m³ de agua tratada.

En relación a la energía eléctrica consumida en el proceso de tratamiento, la información proporcionada indica los siguientes valores anuales:

- + Consumo anual de energía: 2,726,904 kWh
- + Costo anual: \$ 7,132,787

A partir de los valores previos se calcularon los siguientes indicadores:

- + Costo unitario de la energía. 2.62 \$/kWh
- + Consumo unitario de energía: 0.30 kWh/m³
- + Costo energía respecto al costo O & M: 32 %

En la información de costo total de O & M, así como en el consumo y costo de energía eléctrica, se observa que la PTAR Norte tiene el costo unitario y consumo unitario más bajo de las plantas de Aguakan debido a que es la planta que trata mayor caudal, y que la mayoría de la remoción de DBO se efectúa en los filtros biológicos.

En contrapartida, la concentración efluente de N Total es elevada, con promedio histórico de 46 mg/L, el agua efluente de la PTAR Norte cumple con la calidad establecida en la NOM-001 previa y actual para DBO y SST.

Estimación de los costos de operación y mantenimiento

A efecto de comparar el costo de operación reportado por Aguakan contra un costo de referencia se procedió a estimar los costos anuales de un grupo de insumos relevantes:

- + Energía eléctrica,
- + Cloro para desinfección,
- + Polímero para espesado y/o desaguado de lodo,
- + Acarreo de lodo desaguado, y
- + Análisis de laboratorio de agua tratada y lodo para cumplimiento normativo y control de proceso
- + Personal de O & M

Para lo anterior, con base en un caudal medio de 292 L/s y la información de caudal y calidad de agua cruda y tratada proporcionada por el Organismo Operador se efectuó un balance de materia simplificado para establecer la masa de DBO removida, la generación de lodos en el tratamiento del agua, la remoción de sólidos suspendidos volátiles en el proceso de digestión y la masa de lodo desaguado a disposición.

Una vez definidos en el balance de materia los valores requeridos, a partir del caudal y calidad del agua cruda influente a la planta, se procedió a aplicar los factores de dosificación o consumo de los principales insumos (energía eléctrica, cloro polímero para espesado y/o polímero para desaguado) con base en las prácticas adecuadas de operación y, en el caso de los análisis de laboratorio de agua tratada y lodos, a partir de los requerimientos normativos.

En la Error! Reference source not found. se presentan las consideraciones aplicadas para establecer el consumo de los insumos arriba indicados, así como el costo unitario asignado:

Tabla 15:
Factores de consumo y costo unitario de los insumos principales

Insumo	Criterio para establecer el requerimiento	Factor de consumo	Costo unitario
Energía eléctrica	Caudal medio de agua tratada y concentración promedio de DBO	1.76 kWh/kgDBO	2.50 \$/kWh
Cloro	Caudal medio de agua tratada	5.0 mg/L	20 \$/kg
Polímero para espesado	Producción de lodo con base en caudal medio y concentración promedio de DBO y SST	4.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Polímero para desaguado	Fracción volátil del 75 % del lodo producido y remoción del 40 % de SSV en digestor	7.0 kg/ton lodo base seca	150 \$/kg
Acarreo lodo desaguado, base húmeda	Lodo desaguado al 20 % de sólidos Masa de lodo en base seca/0.20	Ton de lodo en base húmeda	150 \$/ton
Análisis laboratorio Agua tratada	NOM-001 población > 50 mil habitantes	2 muestreos/mes	8,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Lodo / biosólidos	NOM-004 Mayor de 1,500 hasta 15,000 (base seca)	2 muestreos/año	10,000 \$/muestreo
Análisis laboratorio Control de proceso	---	1 lote por mes	6,000 \$/mes

El costo del mantenimiento preventivo de la PTAR y los consumibles asociados a esa actividad se estimó aplicando el criterio de destinar un importe anual equivalente al 0.85 % del costo de inversión de la planta con sus actuales características. El costo de la planta se estableció a partir de un costo base de 750 mil pesos por litro – segundo de capacidad media instalada.

Para establecer el costo del personal de operación y mantenimiento se considera una plantilla “tipo” de doce personas, misma que se desagrega en las siguientes plazas: 1 Jefe de planta, 2 Supervisores de operación/mantenimiento, 5 operadores y 4 auxiliares de operación o mantenimiento.

Los sueldos considerados para establecer este rubro de costo están en el rango de 28,000 pesos mensuales para el Jefe de planta y de 12,000 pesos por mes para el auxiliar de operación, los sueldos del resto del personal están comprendidos dentro de este rango.

Los sueldos nominales se afectaron por un factor de 1.50 para incorporar el costo de las diversas prestaciones y seguridad social del personal. De esta forma se determinó un costo total mensual de \$ 306, 000 por concepto de personal.

El factor unitario de consumo de energía eléctrica asignado permite establecer para la PTAR Norte, además de la energía consumida, otros indicadores con el siguiente valor:

- + Consumo unitario de energía: 0.44 kWh/m³
- + Potencia media de operación: 1,152 kilowatts

En la Tabla 16 se presentan los consumos e importes anuales de los rubros de costo establecidos, así como el costo unitario de cada rubro, al dividir su importe anual entre el volumen de agua tratada. Posteriormente, en la Figura se presenta de manera grafica el costo unitario desagregado por insumo.

Tabla 16:
Consumo, importe anual y costo unitario de los principales conceptos de O & M

Insumo	Consumo anual	Importe anual, \$/año	Costo unitario, \$/m ³
Energía eléctrica	4,035,538	10,088,846	1.10
Cloro	46,043	920,851	0.10
Polímero para espesado	9,448	1,417,190	0.15
Polímero para desaguado	13,227	1,984,066	0.22
Acarreo lodo desaguado	8,267	1,240,041	0.13
Análisis laboratorio		284,000	0.03
Mantenimiento		2,231,250	0.24
Personal de O & M		3,672,000	0.40
Total		21,838,244	2.37

Energía eléctrica consumo anual expresado en KWH; cloro, polímero para espesado y polímero para desaguado, en kg; acarreo de lodo, en toneladas.

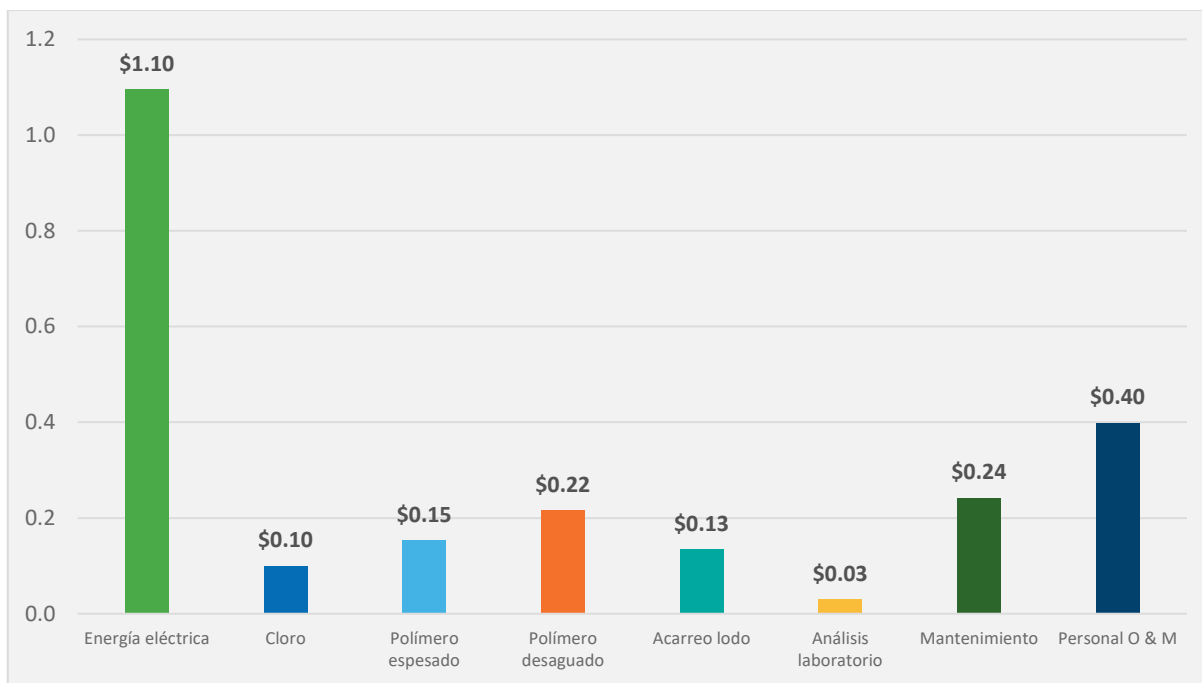


Figura 20 Costo unitario de los principales conceptos de O & M, expresado en \$/m³

El importe anual de operación y mantenimiento estimado en esta sección es de 21.84 millones de pesos, que representa un costo unitario de O & M de 2.37 \$/m³ de agua tratada.

Al comparar el importe estimado anual de O & M con el importe reportado por Aguakan, que es de 22.27 millones de pesos, se tiene en el costo estimado una subestimación de 0.43 mdp's respecto al reportado, que representa una diferencia de $\approx 2\%$.

La diferencia de costos, que en el caso de la planta Norte fue bastante menor, está dentro de un margen razonable, dados los criterios y premisas generales con las que se estimó el costo de O & M de la planta.

Por lo antes expuesto, se considera que el costo de O & M reportado por Aguakan es adecuado y refleja las condiciones de operación y mantenimiento observadas en las visitas efectuadas a la planta, así como en la evaluación de la calidad de agua tratada producida.

Observaciones y recomendaciones generales

A continuación, se presentan las observaciones y recomendaciones que se desprenden de la evaluación de la información proporcionada por el operador y del diagnóstico en campo y gabinete:

1. De acuerdo a la evaluación de criterios de diseño de las unidades de proceso, la calidad de agua tratada obtenida y los costos de operación reportados por Aguakan, la PTAR Norte de Cancún opera adecuadamente y cumple con los criterios para los cuales fue diseñada.
2. Para el cumplimiento de la NOM-001-2021 se recomienda evaluar la sustitución del filtro biológico por sedimentación primaria con by pass de agua pretratada, esto con el fin de remover menor porcentaje de materia orgánica ya que la relación NTK/DBO en el agua cruda es alta.
3. Además se requiere añadir una etapa anaerobia y una anóxica para la remoción biológica de nitrógeno y fósforo, es necesario evaluar si la parte aerobia será suficiente.
4. En caso de que exista potencial de reúso de agua tratada se recomienda incluir filtración terciaria.
5. A futuro es recomendable incluir la digestión anaerobia de lodo para disminuir costos energéticos, esto va en línea con la planeación del organismo operador.



2 Plan de Acciones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

Para la PTAR Norte II se cuenta con proyecto ejecutivo elaborado en 2016, con capacidad para caudal medio de 400 L/s y 600 L/s de caudal máximo. El proyecto se deberá actualizar acorde a los objetivos de calidad de agua tratada de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Las acciones que se proponen para la PTAR Norte I consideran que el caudal medio de diseño se mantiene sin cambio respecto al actual, que es de 350 litros por segundo.

Se incluye en el Plan de Acciones la construcción del primer módulo de tratamiento de agua de la PTAR Norte II, con capacidad para un caudal medio de 200 litros por segundo. De la PTAR Norte II a la fecha está construida y parcialmente equipada la etapa de pretratamiento.

El manejo y estabilización de los lodos generados en la PTAR Norte II será en el tren de lodos de la PTAR Norte I, con digestión anaerobia y aprovechamiento del biogás en sistema de cogeneración.

En la Tabla 17 se presenta el resumen de las acciones propuestas para que la planta pueda cumplir con las especificaciones y límites permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 para las descargas a suelo cárstico.

Tabla 17:
Resumen de las acciones propuestas para la PTAR Norte I

Etapa de Tratamiento	PTAR Norte I
TREN DE AGUA	
Pretratamiento mecánico	Existente

Etapa de Tratamiento	PTAR Norte I
Regulación agua cruda/pretratada	No aplica
Sedimentación primaria	Se incorpora
Filtro biológico	Se decomisiona
Biológico remoción DBO	Existente, mejoramiento
Biológico remoción de fósforo	Se incorpora
Biológico remoción nitrógeno	Se incorpora
Filtración terciaria	No aplica
Desinfección	Cloro gas existente, a mediano/largo UV
TREN DE LODO	
Espesado	Existente, mejoramiento
Digestión aerobia	Se decomisiona a mediano plazo
Digestión anaerobia y cogeneración	Se incorpora
Desaguado	Existente, mejoramiento

Para la PTAR Norte II el tren de tratamiento de agua previsto por Aguakan consta de las siguientes etapas: sedimentación primaria, reactor de lodos activados tipo A2O (sección anaerobia, anóxica y aereada), clarificación secundaria y desinfección ultravioleta. Como ya se mencionó, los lodos primarios y secundarios generados se enviarán al tren de lodos de la PTAR II.

En la Tabla 25 se presenta la descripción y características de las acciones propuestas de rehabilitación, mejoramiento o incorporación de etapas y/o equipos para la PTAR Norte I.

Tabla 18:
Descripción de las acciones propuestas para la PTAR Norte I

Etapas de tratamiento	Norte I
TREN DE AGUA	
Pretratamiento	No requiere acciones específicas para cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021
Tratamiento Primario	1. Evaluar incorporar la etapa de sedimentación primaria • De alta tasa, con remoción moderada de SST y DBO;
Tratamiento Secundario	1. Sacar de operación el filtro biológico existente. • Remueve DBO en exceso y reduce el carbono disponible para efectuar predenitrificación 2. Construir reactor tipo A2O con secciones anaerobia, anóxica y aerobia, para remoción biológica de nitrógeno y fósforo. • El reactor aerobio existente podría proporcionar parte del volumen aerobio requerido
Clarificación Secundaria	1. Se utilizan los clarificadores secundarios existentes
Tratamiento Terciario	1. Filtración terciaria, en caso de reúso de agua tratada.
Desinfección	1. Se utiliza la caseta de cloración existente • Se utiliza el tanque de contacto de cloro existente
TREN DE LODO	
Espesamiento de lodos	1. Requiere ampliar capacidad para manejo de lodos primarios, así como de los lodos de PTAR Norte II
Digestión de lodos	1. Digestión aerobia no requiere acciones a corto plazo, continúa operando el digestor existente 2. Se incorpora digestión anaerobia de lodos 3. Se incorpora acondicionamiento de biogás y cogeneración
Desaguado de lodos	1. Por instalar una centrífuga ya suministrada en el sitio 2. Requiere ampliar capacidad para manejo de lodos de PTAR Norte II

Secado adicional de lodo desaguado	Se envían a la PTAR Norponiente
TEMAS VARIOS	1. Incluir medición de flujo en las corrientes de agua y de lodo. 2. Incluir sensores en reactor de lodos activados y en agua clarificada; para fines de control de proceso, ahorro energético y monitoreo de calidad de agua tratada.

A continuación, en Figura 21 se presenta el diagrama de flujo del tren de tratamiento de agua y de lodos de la PTAR Norte I incorporando las acciones propuestas para que la planta produzca agua tratada que cumpla con la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descargas a suelo cárstico.

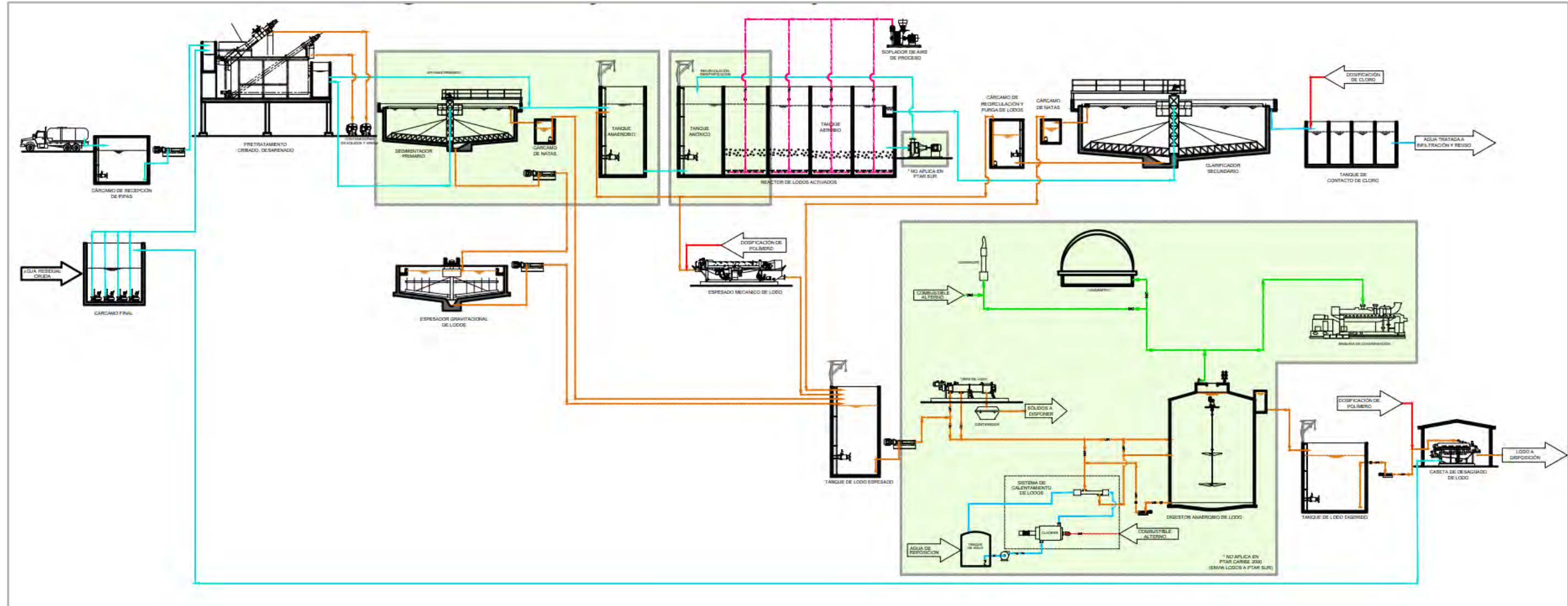


Figura 21 Diagrama de flujo de la PTAR Norte I con las acciones propuestas



3 Presupuesto de las Acciones Propuestas para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el procedimiento realizado para la estimación de costos de las acciones necesarias por ejecutar para que la PTAR Norte Cancún cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; en dicho presupuesto se incluye el costo de obra civil, electromecánica, eléctrica, instrumentación y control para obra nueva o ampliaciones, rehabilitación de obras existentes y proyecto ejecutivo y supervisión de obra y proyecto ejecutivo.

Las acciones de mejora surgen de la visita y diagnóstico técnico que se presenta previamente, así como de las entrevistas e información recabada con las áreas responsables de la operación y gestión de los recursos para saneamiento.

Techo financiero

El techo financiero para la implementación de las acciones de mejora y rehabilitación de la PTAR, se realizó a partir de costos paramétricos, como lo indican los Términos de Referencia. Para lo anterior se recurrió a costos base de unidades de proceso y equipamiento similares y de capacidad comparable con las necesidades de las PTAR que forman parte de este estudio, de igual manera dichos costos son ajustados de acuerdo a la capacidad necesaria.

En la Tabla 19 se muestran los costos base por unidad de proceso, los cuales corresponden al costo de mercado establecido en proyectos realizados en el año 2021 y 2022 en Quintana Roo,

en plantas de tratamiento con proceso de remoción biológica de nitrógeno y fósforo, así como equipamiento electromecánico y de proceso, tanto de tipo convencional como relativamente nuevo en la región, como es la filtración terciaria y la desinfección con lámparas ultravioleta.

Tabla 19:
Costos base por unidad de proceso, PTAR con remoción biológica de nutrientes y capacidad media de 150 L/s

Unidad de proceso	Costo base en MDP
Tren de Tratamiento de Agua	
Pretratamiento mecánico	20.97
Regulación agua cruda/pretratada	12.65
Sedimentación primaria	13.12
Caja distribuidora agua primaria	0.99
Filtro biológico	
Biológico remoción DBO	22.99
Biológico remoción de fósforo	2.50
Biológico remoción nitrógeno	5.75
Clarificación secundaria	14.80
Recirculación y purga de lodo	6.89
Filtración terciaria	12.12
Desinfección	10.49
Pozo de infiltración	1.60
Tren de Tratamiento de Lodo	
Espesado de lodo	7.79
Digestión aerobia	16.09
Digestión anaerobia	59.55
Tanque de lodo digerido	3.77

Unidad de proceso	Costo base en MDP
Desaguado de lodo	17.43
Cogeneración	18.81

Techo financiero de inversión en plantas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con las acciones a realizar en la PTAR se estimaron los costos de inversión, esto de acuerdo con los costos base y el factor de ajuste, los cuales están relacionado con el caudal de tratamiento.

A continuación se describe el procedimiento aplicado a cada planta de tratamiento (identificada como PTAR "n") para establecer el techo financiero preliminar de los recursos económicos requeridos para implementar el plan de acciones:

1. Los costos de referencia de las unidades de proceso se ajustaron a valores de noviembre de 2022 con el factor de actualización que resulta de dividir el INPC de noviembre entre el INPC del mes en que se originó el presupuesto.

A manera de ejemplo, a continuación se describe el procedimiento:

- Fecha del presupuesto de la unidad de proceso o PTAR de referencia: octubre de 2021.

- Valor del INPC en octubre de 2021: 115.561

- Valor del INPC de noviembre de 2022: 125.997

- Factor de actualización costo de referencia: $125.997/115.561 = 1.090$

2. El costo de referencia del proceso de digestión anaerobia y del sistema de cogeneración se determina con base en un digestor anaerobio con sistemas periféricos; tamizado de lodo, tratamiento lateral de la corriente de desaguado de lodo anaerobio; antorcha de quemado de biogás, gasómetro para almacenar el biogás generado, acondicionamiento de biogás; caseta de equipos de digestión y sistema de cogeneración.

En la siguiente tabla se presenta el desglose y capacidad de los componentes de las etapas de digestión anaerobia de lodos y del sistema de cogeneración:

Etapa de Digestión Anaerobia de Lodo

Concepto	Importe actualizado, mdp
Tamizado de lodo (capacidad para 5 L/s de lodo espesado al 5%)	1.22
Digestor anaerobio mesofílico (de 5,700 m ³)	43.25
Gasómetro de membrana y periféricos (de 1,000 m ³)	6.14
Quemador de biogás y periféricos (capacidad para 225 m ³ /h)	1.59
Edificios operativos	2.71
Tratamiento lateral del agua retirada en desaguado de lodo	4.64
Subtotal	59.55
Obra eléctrica (12 % del subtotal)	7.44
Control (3 % del subtotal + obra eléctrica)	2.01
Contingencias (8 % del subtotal + obra eléctrica + control)	5.52
Total	74.53

Sistema de Cogeneración

Concepto	Importe actualizado, mdp
Sistema de tratamiento de biogás (capacidad para 225 m ³ /h) para remoción de humedad, impurezas y H ₂ S	7.10
Sistema integral de cogeneración (capacidad de 500 kW eléctricos)	11.72
Total	18.81

El costo actualizado de las unidades de proceso se ajustó posteriormente en función de la capacidad (a caudal medio) de las unidades de proceso de la PTAR "n", en relación con la capacidad de la PTAR de referencia, acorde a lo siguiente:

$$\text{Costo PTAR "n"} = \text{Costo PTAR de referencia} * ((\text{Tamaño PTAR "n"} / \text{Tamaño PTAR referencia})^{0.70})$$

La capacidad de la PTAR de referencia es para un caudal promedio de 150 L/s.

A manera de ejemplo, al utilizar la ecuación anterior, y considerando que la PTAR "n" es de 350 L/s de capacidad, se obtiene un multiplicador de 1.81, mismo que se aplica sobre el importe de las unidades de proceso de la PTAR de referencia.

De esta forma, en lugar de ajustar el costo de la PTAR "n" con una relación lineal entre el tamaño de ambas plantas (2.33), el criterio toma en cuenta que el costo unitario de inversión (\$ por L/s de capacidad) disminuye al aumentar el tamaño de la unidad de proceso y/o de la PTAR.

Este procedimiento de ajuste de costo se utilizó en las unidades de proceso cuyo dimensionamiento está determinado por la capacidad y carga hidráulica, como es el caso de las etapas que a continuación se indican:

- Pretratamiento (cribado y desarenación)
- Regulación y/o bombeo de agua cruda/pretratada
- Sedimentación primaria
- Caja distribuidora agua primaria
- Clarificación secundaria
- Recirculación y purga de lodo
- Filtración terciaria
- Desinfección
- Tanque de lodo digerido

Asimismo, el procedimiento de ajuste de costo descrito en este numeral también es aplicable en los procesos biológicos de tratamiento de agua y en las operaciones y procesos del tren de tratamiento de lodos, cuando en la PTAR "n" se presenta la condición de carga influente orgánica y de sólidos que se describe en el siguiente numeral.

3. El factor de ponderación arriba referido se utiliza de manera directa si la carga contaminante influente a la PTAR "n", expresada como la concentración promedio de la DBO y SST en el agua residual cruda, es comparable a la de ($\leq 20\%$) la PTAR de referencia.

La concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente a la PTAR de referencia es 350 mg/L.

Se considera que el agua residual influente a la PTAR "n" es comparable al agua residual de la PTAR de referencia, cuando la concentración promedio de DBO y SST está en el rango de $\pm 20\%$ a la concentración indicada en el párrafo previo.

4. A continuación se enlistan las operaciones y procesos del tren de tratamiento de agua y de lodos que, en caso de variación mayor al 20 % en la concentración promedio de DBO y SST en el agua residual influente, estarían sujetos a ajuste de costo adicional al ya aplicado en el numeral 3.
 - Filtro rociador

- Reactor de lodos activados, remoción DBO
- Reactor de lodos activados, remoción de fosforo
- Reactor de lodos activados, remoción nitrógeno
- Espesado de lodo
- Digestión aerobia
- Digestión anaerobia
- Desaguado de lodo

En los casos en que la calidad del agua residual influente a la PTAR "n" tiene una variación superior al 20%, hacia arriba o hacia abajo, se procedió a aplicar un ajuste adicional al costo de inversión en las operaciones y procesos del listado inmediato previo.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual influente es $\approx 30\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.05 o 0.90, según corresponda.

Cuando la concentración promedio de DBO y SST del agua residual es $\approx 40\%$ mayor o menor a 350 mg/L, al costo determinado se aplica un multiplicador de 1.12 o 0.80, según corresponda.

5. Se aplicó un factor de ponderación para los casos en que la actividad propuesta no es una unidad de proceso nueva y completa, es decir que consiste en la rehabilitación, mejoramiento o complemento de capacidad de una etapa de proceso o unidad existente.

El valor del factor de ponderación asignado en estos casos está en el rango de 0.35 a 0.65, a criterio del especialista, en función del grado de intervención que se requiere para la unidad de proceso en cuestión.

En términos generales, los valores cercanos al límite inferior del rango se aplicaron cuando la acción implicaba rehabilitación civil única o principalmente; los valores cercanos al límite superior se aplicaron cuando la intervención implica también reequipamiento electromecánico.

6. Una vez establecido el importe de inversión por planta de las principales unidades del tren de tratamiento de agua y de lodos, para determinar el importe de otros componentes de la PTAR a dicho importe se aplicó un valor seleccionado de los rangos de porcentaje que a continuación se indican:

Equipo menor:	5 % a 8 %
Vialidades, patios y obras exteriores:	1 % a 5 %
Obra eléctrica:	10 % a 15 %
Automatización y control:	3 % a 5 %

Imprevistos y contingencias:

8 % a 12 %

7. El importe por elaboración del proyecto ejecutivo de las acciones propuestas por planta se determinó a partir de un porcentaje, en el rango del 1.2 % al 3.5 %, mismo que se aplicó sobre el importe total estimado.
8. El costo de la supervisión de la ejecución y puesta en marcha de las obras y equipamiento propuestas en el Plan de Acciones por planta, se estableció aplicando un porcentaje del 3.5 % sobre el importe total estimado, sin incluir los importes correspondientes al costo del proyecto ejecutivo y de capacitación.

Cogeneración de biogás y criterios para recomendación de inclusión de paneles solares

La selección de la digestión anaerobia como proceso de tratamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, orientado a la generación de biogás para su aprovechamiento, o bien la opción de instalar paneles solares en estas plantas, ha sido justificada mediante criterios técnicos específicos. Estos criterios incluyen la capacidad operativa de las plantas, la disponibilidad de espacio físico y las propiedades de la carga orgánica influente. En particular, en el caso de las PTAR ubicadas en el Estado de Quintana Roo, el contexto local en que se encuentra cada planta cobra especial relevancia, dado que las condiciones geográficas, ambientales y de infraestructura turística pueden influir en la viabilidad y eficiencia de cada tecnología implementada.

Este análisis permite una decisión fundamentada, buscando optimizar tanto el rendimiento energético como el aprovechamiento sostenible de los recursos locales.

Antecedentes

Como parte del diagnóstico para el mejoramiento de las PTAR de Quintana Roo mayores a 100 L/s, la digestión anaerobia se considera en las siguientes PTAR:

1. PTAR Norte
2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur que recibe también los lodos de la PTAR Caribe
4. PTAR Saas Tun Ha (a futuro, mediano plazo)

Adicionalmente, la instalación de paneles solares se considera en las siguientes PTAR, de las cuales las primeras tres son instalaciones existentes:

1. PTAR Norte

2. PTAR Norponiente
3. PTAR Sur
4. PTAR El Rey
5. PTAR Saas Tun Ha
6. PTAR San Miguelito
7. PTAR Bicentenario
8. PTAR Centenario

Digestión Anaerobia y Cogeneración

La digestión anaerobia es un proceso biológico mediante el cual los lodos residuales se descomponen en ausencia de oxígeno, generando biogás. El biogás, compuesto principalmente de metano, puede ser aprovechado para producir electricidad y calor mediante sistemas de cogeneración. Además de reducir el volumen de lodos, la digestión anaerobia permite un manejo más eficiente de los residuos, mejorando la sostenibilidad de las plantas al aprovechar el potencial energético del metano.

Los principales aspectos considerados para proponer digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás en las PTAR se presentan en seguida. Todos fueron considerados en conjunto para cada planta.

Condiciones climáticas

La temperatura está relacionada con la velocidad de las reacciones químicas. En el diseño de la digestión anaerobia, la temperatura aumenta la velocidad de hidrólisis y de formación de metano, además disminuye el mínimo tiempo de retención requerido para llegar a una destrucción de sólidos aceptable (38 % en SSV).

Para un proceso mesofílico, que es el seleccionado para las PTAR de Quintana Roo, las temperaturas óptimas se encuentran entre los 30 y 38°C (Metcalf & Eddy, 2014), lo cual es fácilmente alcanzado en la región, con temperaturas de agua residual alrededor de los 30°C todo el año. El no requerir un sistema para control fino de la temperatura es una gran ventaja de toda la zona.

Carga orgánica influente

Se requiere mantener cierta carga orgánica para mantener el equilibrio entre los microorganismos que realizan la digestión anaerobia y mantener una producción de biogás constante. La carga orgánica alimentada al digestor proviene de la fracción de SSV en los lodos generados en el proceso primario y/o secundario y éstos a su vez dependen de las características del agua residual.

En general, la carga orgánica influente necesaria proviene de un análisis detallado del proceso para cada caso, sin embargo, existen lineamientos con reglas generales para anticipar este resultado. En el caso de las PTAR de Quintana Roo, se consideraron para digestión anaerobia

las PTAR que en su operación actual o a capacidad plena, recibieran más de 300 L/s o carga orgánica igual o mayor a 7.5 ton DBO/d, esto de acuerdo con estudios técnicos realizados previamente por GIZ (GIZ México, 2017).

Toxicidad

La digestión anaerobia es un proceso sensible a variaciones de pH y puede verse afectada por la presencia de ciertas sustancias inhibidoras en las aguas residuales. Para la instalación de una nueva PTAR, es fundamental realizar análisis previos para descartar la presencia de estos compuestos que puedan interferir en el proceso. En el presente caso, dado que las PTAR evaluadas ya están en operación, se ha verificado que en los sitios propuestos para la digestión anaerobia no se han registrado historiales de inhibiciones significativas al proceso biológico, lo que garantiza su viabilidad.

Volumen y tipo de lodos generados

Una de las principales ventajas de la digestión anaerobia es la generación de biogás, siendo más eficiente esta generación cuanto mayor es la carga orgánica en los sólidos alimentados. En los sitios propuestos, además de lodos secundarios, se procesan lodos primarios con alto contenido de SSV, lo que incrementa la generación de biogás. Las altas cargas orgánicas influentes a las plantas aseguran buena generación de sólidos, maximizando la eficiencia del sistema de digestión.

Disponibilidad de espacio

Los sitios con propuesta de digestión anaerobia fueron revisados para la disponibilidad de espacio para una unidad de digestión anaerobia junto con gasómetro e instalaciones de cogeneración y manejo de biogás.

Disponibilidad operativa

La digestión anaerobia es una unidad significativamente más compleja que las demás en el tren de tratamiento, lo que demanda mayor capacidad técnica y un personal operativo especializado para su correcta operación a lo largo de la vida útil de la PTAR. En las plantas propuestas, se considera que cuentan con el personal y la capacidad técnica necesarios para implementar y mantener este proceso de manera eficiente.

Viabilidad operativa

Con base en la calidad de agua, la temperatura, el caudal influente y el tipo de proceso, es posible estimar la cantidad de lodos producidos en cada PTAR. Los lodos producidos son la base para estimar el tamaño ideal del digestor anaerobio. De acuerdo con la literatura (Metcalf & Eddy, 2014) el tiempo de retención recomendado para los lodos a 30°C es de 6 a 14 días y la carga orgánica puede variar entre los 1.6 y 4.8 kg SSV/m³ d.

A manera de ejemplo, con el volumen de 5,700 m³/d y a una carga de 2.4 kg SSV/ m³ d sería

posible alimentar hasta 13.7 toneladas al día de lodo. Este flujo másico a una concentración de 3.5 % en sólidos tendría un tiempo de residencia de 14.6 días. La producción de lodo actual de las PTAR seleccionadas para digestión anaerobia varía entre 6.7 y 9.9 toneladas al día, y puede ser aún mayor de acuerdo con la capacidad de tratamiento de agua residual instalada. El volumen seleccionado considera este crecimiento además de las necesidades actuales.

Conclusiones para biogás y cogeneración

Los aspectos anteriores se analizaron y forman parte del análisis de costo presentado. En general en las PTAR seleccionadas es positiva la presencia de la digestión anaerobia. En resumen, para seleccionar las PTAR donde es viable instalar digestión anaerobia se consideró que:

1. La temperatura de la zona es favorable con 30°C.
2. La carga orgánica influente a las PTAR y/o el caudal se encuentran en el umbral de 7.5 ton/d de DBO o 300 L/s de caudal tratado.
3. Los procesos biológicos existentes no presentan obstáculos por sustancias inhibidoras.
4. La presencia de lodo primario favorece la producción de biogás.
5. Existe suficiente espacio para la instalación de las unidades respectivas.
6. Existe suficiente personal operativo y capacidad técnica para mantener la unidad funcionando eficientemente.
7. El volumen seleccionado como base para los costos cubre los rangos de operación actuales y futuros de cada PTAR.
8. En el balance económico, la producción y aprovechamiento del biogás es un instrumento importante para hacer viable la operación de las PTAR más grandes.

Generación de Energía Solar

A diferencia de la digestión anaerobia, la instalación de paneles solares es un proceso más sencillo y viable para prácticamente cualquier PTAR. El criterio principal para su implementación fue la disponibilidad de espacio en la planta y su tamaño, siendo seleccionadas aquellas de mediana o gran escala.

Las plantas que no tienen suficiente carga orgánica para justificar la digestión anaerobia, pero disponen de amplias áreas, pueden aprovechar los paneles solares para reducir su dependencia de la red eléctrica y generar energía renovable de manera sostenible. En consecuencia, esta tecnología se considera para casi todas las PTAR.

El costo de implementación de ambas tecnologías no es equivalente, siendo la digestión anaerobia considerablemente más costosa. Sin embargo, como se muestra en el análisis económico, la generación de biogás a escalas superiores al umbral establecido por la GIZ produce una cantidad significativa de energía eléctrica, generando importantes ahorros a largo plazo. Además, la digestión anaerobia requiere una mayor capacidad técnica para su operación. En contraste, los paneles solares, más sencillos de instalar y mantener, representan

una opción accesible y conveniente para todas las PTAR.

A continuación se presenta una tabla resumen con los principales criterios utilizados para la selección de digestión anaerobia y aprovechamiento de biogás, así como para la instalación de paneles solares.

		Principales Criterios para selección de Digestión Anaerobia						Criterio de selección para la instalación de Paneles Solares	
Nombre de la planta	Capacidad instalada (L/s)	DBO entrada (mg/L)	Carga orgánica influente (Ton DBO /día)	Carga orgánica > 7.5 ton / día	Sedimentación primaria (Lodo primario)	Disponibilidad operativa	Digestión Anaerobia	Espacio disponible	Paneles solares
Norte	350	261	7.9	SI	SI, se incorpora	SI	SI	SI	SI

Resumen de inversión, techo financiero

En la Tabla 20 se muestra el monto de inversión por unidad de proceso o componente de proyecto, y en la Figura 22 se muestra su distribución porcentual.

Tabla 20:
Monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Etapa o componente	Importe PTAR Norte I, mdp's	Importe PTAR Norte II, mdp's
Proyecto ejecutivo	2.70	2.50
Bombeo / regulación / pretratamiento / primario	25.09	17.26
Remoción DBO y nutrientes, desinfección	14.93	77.55
Tratamiento terciario		
Tren de tratamiento de lodos	52.46	
Digestión anaerobia	59.55	
Cogeneración	18.81	
Paneles solares		
Equipo menor	8.54	4.74

Terracerías, vialidades, patios	7.69	3.79
Obra eléctrica	21.35	11.38
Automatización y control	5.13	2.84
Imprevistos y contingencias	13.67	7.58
Supervisión	7.97	4.39
Capacitación	0.40	0.40
Total	238.28	132.44

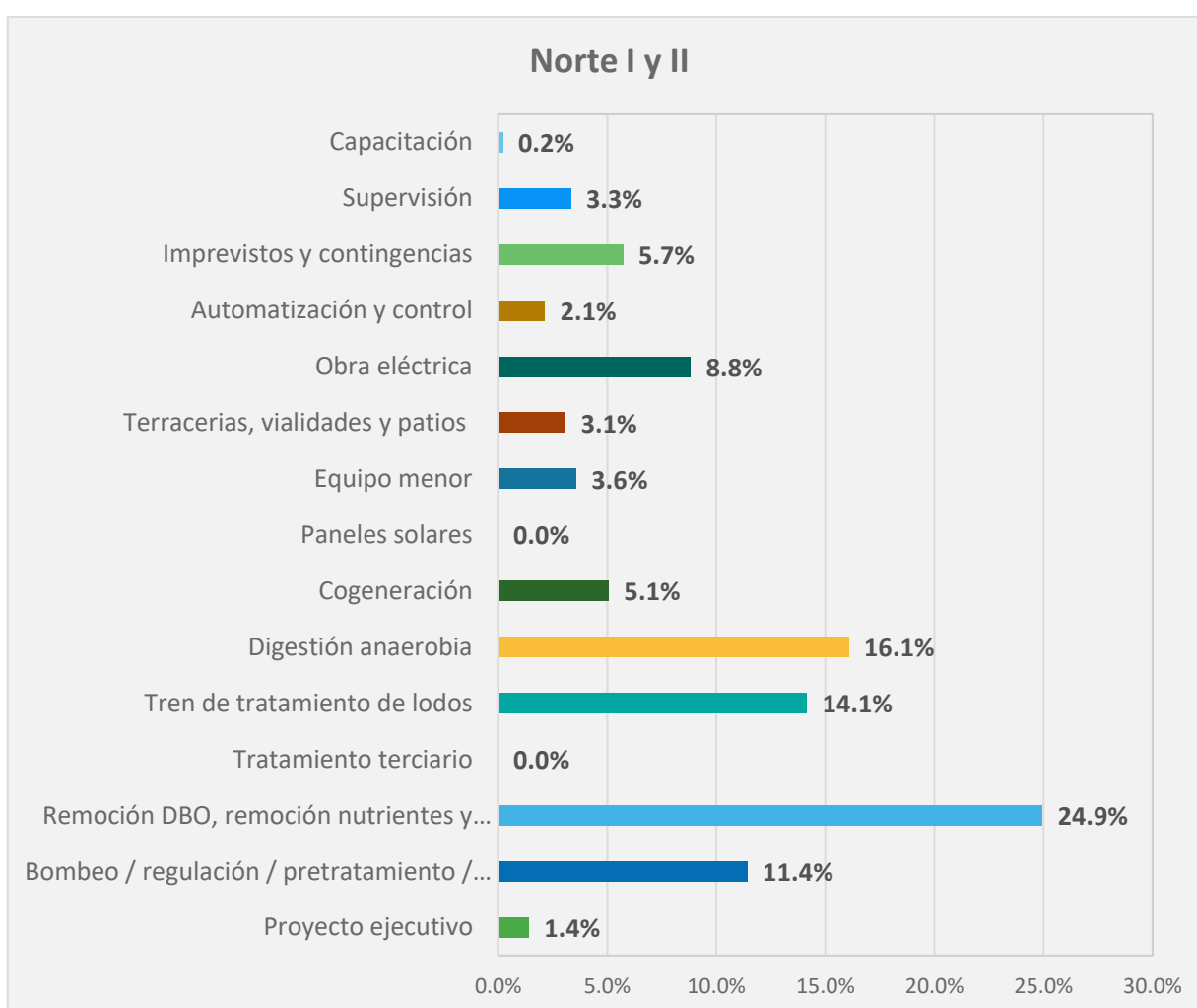


Figura 22 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

En la Tabla 21 se muestra el resumen del techo financiero total.

Tabla 21:
Monto de inversión, millones de pesos

PTAR	Capacidad instalada, L/s	Capacidad propuesta, L/s	Inversión requerida	Inversión Digestión Anaerobia	Inversión Cogeneración	Inversión Paneles solares	Inversión Total	Inversión unitaria, k\$/lps
Norte I	350	350	140.2	74.53	23.54		238.3	681
Norte II		200	132.4				132.4	662

A continuación, se muestra la estimación detallada de costos, se describe la unidad de proceso, el factor de ajuste integrado y monto de inversión estimado, así como los porcentajes aplicados a las obras complementarias: vialidades, obra eléctrica, de control e instrumentación, imprevistos, proyecto ejecutivo, supervisión y capacitación.

Tabla 22:
Estimación detallada de costos PTAR Norte I

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tren de Tratamiento de Agua		
Pretratamiento mecánico		
Regulación agua cruda/pretratada	1.81	23.75
Sedimentación primaria	1.36	1.34
Caja distribuidora agua primaria		
Filtro biológico		
Biológico remoción DBO	1.81	4.53
Biológica remoción de fósforo	1.81	10.40
Biológico remoción nitrógeno		
Clarificación secundaria		
Recirculación y purga de lodo		
Filtración terciaria		
Desinfección		
Pozos de infiltración		
Tren de Tratamiento de Lodos	1.81	14.09

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Espesado		
Digestión aerobia	1.0	59.55
Digestión anaerobia	1.81	6.82
Tanque de lodo digerido	1.81	31.55
Desaguado	1.0	18.81
Cogeneración		
Subtotal		170.84
Equipo menor	5.0%	8.54
Terracerías, vialidades y patios	4.5%	7.69
Obra eléctrica	12.5%	21.35
Automatización y control	3.0%	5.13
Imprevistos y contingencias	8.0%	13.67
Proyecto ejecutivo		2.70
Supervisión		7.97
Capacitación		0.40
Total		238.28

Tabla 23:
Estimación detallada de costos PTAR Norte II

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Tren de Tratamiento de Agua		
Pretratamiento mecánico		
Regulación agua cruda/pretratada	1.22	16.05
Sedimentación primaria	1.22	1.21
Caja distribuidora agua primaria		
Filtro biológico	1.22	28.11
Biológico remoción DBO	1.22	3.06
Biológica remoción de fósforo	1.22	7.03
Biológico remoción nitrógeno	1.22	18.10
Clarificación secundaria	1.22	8.42
Recirculación y purga de lodo		
Filtración terciaria	1.22	12.83
Desinfección		

Unidad de proceso	Factor de ajuste	Monto en MDP
Pozos de infiltración		
Tren de Tratamiento de Lodos		
Espesado		
Digestión aerobia		
Digestión anaerobia		
Tanque de lodo digerido		
Desaguado		
Cogeneración		
Subtotal		94.81
Equipo menor	5.0%	4.74
Terracerías, vialidades y patios	4.0%	3.79
Obra eléctrica	12.0%	11.38
Automatización y control	3.0%	2.84
Imprevistos y contingencias	8.0%	7.58
Proyecto ejecutivo		2.50
Supervisión		4.39
Capacitación		0.40
Total		132.44



4 Programa de inversiones para el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

En el presente documento se describe el programa de inversiones necesarias por ejecutar para que la PTAR cumpla con la calidad del agua establecida en la NOM-001-SEMARNAT-2021; este programa abarca del año 2023 al año 2027.

Este programa de inversiones es el resultado de las acciones propuestas para mejorar la calidad del agua tratada de las PTAR con capacidad de tratamiento igual o mayor a 100 L/s en el estado de Quintana Roo, así como el presupuesto derivado del plan de acciones. La programación de las inversiones se basa en las necesidades propias de cada planta considerando el objetivo principal, que es el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Programa de Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021

El 5 de diciembre de 2022 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación los:

LINEAMIENTOS que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.

Los Lineamientos constan en total de veintitrés artículos, más un artículo transitorio, así como el denominado Anexo A: Instructivo para la Información Requerida en el Sistema.

Los Lineamientos están estructurados en seis capítulos:

- + Capítulo Primero, Disposiciones Generales
- + Capítulo Segundo, Requisitos para la Presentación y Registro de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Tercero, De los Plazos de los Programas para el Cumplimiento
- + Capítulo Cuarto, Procedimiento para la presentación, registro y revisión de los Programas para el Cumplimiento, así como del Informe de Avances
- + Capítulo Quinto, De las Verificaciones
- + Capítulo Sexto, De las Sanciones

Aspectos Clave de los Lineamientos

Artículo 2. Sujeto Regulado: El responsable de descargas de aguas residuales al que resulte aplicable la NOM-001-SEMARNAT-2021, quien podrá presentar sus Programas para el Cumplimiento ante la Comisión.

Artículo 5. La presentación del Programa para el Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-2021, **es de naturaleza voluntaria**, por lo que, en caso de su incumplimiento, el responsable de la descarga de aguas residuales en cualquier cuerpo receptor propiedad de la nación, quedará sujeto a los plazos establecidos en la mencionada Norma Oficial Mexicana

Artículo 6. El Sujeto Regulado presentará su Programa para el Cumplimiento, en los siguientes supuestos:

- a) Cuando **deba modificar sus instalaciones** con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como el Apéndice Normativo de la NOM-001-SEMARNAT-2021, y que los ajustes y acciones que se deban ejecutar de acuerdo a los estudios realizados por dicho Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor, en el Artículo 2o Transitorio de la NOM, o bien,
- b) Que el Sujeto Regulado **deba modificar los procesos productivos de las actividades que generan la descarga de aguas residuales**, con la finalidad de dar cumplimiento a los parámetros y límites permisibles de contaminantes previstos en las Tablas 1 y 2, así como al Apéndice Normativo y que dichas modificaciones, de acuerdo con los análisis o la evidencia del Sujeto Regulado, rebasen la temporalidad establecida para la entrada en vigor.

Artículo 7. El Sujeto Regulado, en caso de presentar el Programa para el Cumplimiento lo hará por cada uno de los puntos autorizados en su Permiso de Descarga, y que, para cumplir con las disposiciones establecidas en la NOM-001-SEMARNAT-2021 se ubiquen en alguno de los supuestos establecidos en el Artículo 6 de los Lineamientos.

Artículo 8. Una vez registrado el Programa para el Cumplimiento, y en tanto este se encuentre vigente, en concordancia con el Artículo 5º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021, el Sujeto Regulado deberá cumplir, además de lo comprometido en el Programa, con los límites y parámetros establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996, para gozar de los beneficios e incentivos que para tales efectos establezca la LFD vigente.

Artículo 10. El Programa para el Cumplimiento, contendrá:

- + Nombre, denominación o razón social del Sujeto Regulado;
- + RFC del Sujeto Regulado;
- + Datos de identificación del Permiso de Descarga; Volumen de descarga; Datos del medidor o dispositivo de medición de las aguas residuales descargadas; Coordenadas del punto de descarga;
- + Datos generales del representante legal; Correo electrónico;
- + Justificación de la solicitud para la aplicación del Programa para el Cumplimiento;
- + Cronograma de actividades para las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento; Periodo solicitado;
- + E-Firma del Sujeto Regulado o representante legal.

Artículo 12. Los Programas para el Cumplimiento deberán presentarse ante la CONAGUA, por el Sujeto Regulado **a partir de que entre en vigor la NOM-001-SEMARNAT-2021 y hasta el 3 de abril del 2023.**

El Sujeto Regulado que no presente su Programa para el Cumplimiento en el periodo señalado, se sujetará a los plazos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 13. Los plazos que se establezcan en el Cronograma de Actividades para el seguimiento de las acciones comprometidas en los Programas para el Cumplimiento **no deberán rebasar el 11 de marzo de 2027.**

Artículo 15. La CONAGUA realizará revisiones aleatorias a los Programas para el Cumplimiento, podrá solicitar al Sujeto Regulado, las aclaraciones o información adicional que considere necesarias. En el supuesto de que el Sujeto Regulado no atienda el requerimiento de información dentro de los veinte días hábiles siguientes, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y será aplicable lo establecido en el Artículo 2º Transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 16. Una vez registrado el Programa ante la CONAGUA, no será objeto de modificación, salvo en el caso que el Sujeto Regulado justifique la necesidad de realizar algún cambio y no exceda el plazo originalmente establecido.

Artículo 17. El Sujeto Regulado debe presentar **dentro de los primeros cinco días hábiles de los meses de marzo y septiembre de cada año**, a partir de la fecha del registro, el avance de actividades mediante la carga de información que solicite el Sistema de Gestión en el apartado correspondiente al Informe de Avance del Programa para el Cumplimiento. Cuando el Sujeto Regulado no envíe en tiempo y forma la información del Informe de Avance, el Programa para el Cumplimiento quedará sin efecto y se aplicarán las disposiciones de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 21. La CONAGUA procederá a cancelar el Programa para el Cumplimiento y su registro, cuando compruebe que el Sujeto Regulado no ha cumplido con lo comprometido en el programa registrado. La CONAGUA, procederá a notificar la cancelación del Programa, por lo que quedarán sin efectos las acciones de cumplimiento propuestas por el Sujeto Regulado en su respectivo Programa, aplicándose las disposiciones correspondientes de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Artículo 22. Cuando las acciones comprometidas en el Programa para el Cumplimiento presentado impliquen la suspensión de sus procesos productivos y actividades para llevar a cabo las acciones tendientes a la conversión de procesos productivos o la instalación de maquinaria, equipos o plantas que se requieran para el cumplimiento de los parámetros y límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, y deba quedar fuera de operación el sistema de tratamiento de aguas residuales, el Sujeto Regulado deberá dar aviso a la CONAGUA, al menos 30 días hábiles antes de que esto ocurra, e indicar el periodo por el que prevalecerá dicha situación, el cual **no deberá exceder de tres meses**, y podrá presentarse **hasta un máximo de dos ocasiones** durante la vigencia del Programa.

De llevar a cabo la suspensión de sus procesos de tratamiento de aguas residuales sin el aviso correspondiente se aplicarán las sanciones previstas. Una vez recibida la solicitud, el Sistema de Gestión emitirá el comprobante que acreditará que la solicitud fue hecha en tiempo y forma.

Artículo 23. En caso de incumplimiento a los compromisos establecidos en el Programa para el Cumplimiento, quedan sin efecto las prerrogativas que ampara dicho documento, por lo cual el Sujeto Regulado será acreedor a las sanciones que correspondan y, en su caso, estará obligado a efectuar el pago de los derechos por el uso y aprovechamiento de cuerpos receptores de descargas de aguas residuales propiedad de la nación, a partir de la fecha del incumplimiento, así como de aquéllos que se hubieren generado con anterioridad, con sus accesorios, conforme a la LFD vigente.

Programa de inversión anual

Como se mencionó anteriormente, el monto de inversión total del Plan de Acciones es de 370.72 millones de pesos (mdp) para la PTAR Norte I yII, inversión a realizarse en 5 años a partir del año 2023 hasta marzo del 2027, acorde al plazo previsto en los Lineamiento que establecen las Disposiciones administrativas de carácter general para la presentación de los programas para el cumplimiento establecidos en el artículo 4º transitorio de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

En el presente apartado se muestra el desglose anual del Plan de Acciones, donde se describe el monto de inversión por año y unidad de proceso y/o componente del proyecto programado, así como los importes anuales y acumulados y su porcentaje de participación en la inversión.

Tabla 24:
Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado Norte I

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
A	Proyecto ejecutivo	2.70	0.00	0.00	0.00	0.00	2.70
		100.0 %	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
B	Cárcamo, regulación, pretratamiento, y/o tratamiento primario	10.03	15.05	0.00	0.00	0.00	25.09
		40.0%	60.0 %	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
C	Tren de tratamiento de agua	0.00	8.96	5.97	0.00	0.00	14.93
		0.0%	60.0 %	40.0%	0.0%	0.0%	100.0%
D	Tratamiento terciario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
E	Tren de tratamiento de lodos	0.00	28.00	50.40	33.60	0.00	112.01

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
		0.0%	25.0 %	45.0%	30.0%	0.0%	100.0%
F	Cogeneración (y/o paneles solares)	0.00	0.00	0.00	15.99	2.82	18.81
		0.0%	0.0%	0.0%	85.0%	15.0%	100.0%
G	Equipo menor	0.63	2.56	2.77	2.44	0.14	8.54
		7.3%	30.0 %	32.5%	28.6%	1.6%	100.0%
H	Terracerías, vialidades y patios	0.56	2.30	2.50	2.20	0.13	7.69
		7.3%	30.0 %	32.5%	28.6%	1.6%	100.0%
I	Obra eléctrica	1.57	6.40	6.94	6.10	0.35	21.35
		7.3%	30.0 %	32.5%	28.6%	1.6%	100.0%
J	Automatización	0.38	1.54	1.66	1.46	0.08	5.13
		7.3%	30.0 %	32.5%	28.6%	1.6%	100.0%
K	Imprevistos y contingencias	1.00	4.10	4.44	3.91	0.22	13.67
		7.3%	30.0 %	32.5%	28.6%	1.6%	100.0%
	Total anual y gran total, mdp's	17.46	71.49	77.48	67.98	3.87	238.28
	Acumulado anual, mdp's	17.46	88.95	166.43	234.41	238.28	
	Total anual y gran total, %	7.3%	30.0 %	32.5%	28.5%	1.6%	100%

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
	Acumulado anual, %	7.3%	37.3 %	69.8%	98.4%	100.0 %	

Tabla 25:

Programa de inversión anual por unidad de proceso y/o componente del proyecto programado Norte II

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
A	Proyecto ejecutivo	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50
		100%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100%
B	Cárcamo, regulación, pretratamiento, y/o tratamiento primario	0.00	17.26	0.00	0.00	0.00	17.26
		0.0%	100%	0.0%	0.0%	0.0%	100%
C	Tren de tratamiento de agua	0.00	38.78	23.27	15.51	0.00	77.55
		0.0%	50%	30%	20%	0.0%	100%
D	Tratamiento terciario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
E	Tren de tratamiento de lodos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
F	Cogeneración (y/o paneles solares)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
G	Equipo menor	0.12	2.73	1.13	0.76	0.00	4.74
		2.6%	57.6%	23.9%	15.9%	0.0%	100%

Clave	Descripción	2023	2024	2025	2026	2027	Gran total
H	Terracerías, vialidades y patios	0.10	2.18	0.91	0.60	0.00	3.79
		2.6%	57.6%	23.9%	15.9%	0.0%	100%
I	Obra eléctrica	0.29	6.55	2.72	1.81	0.00	11.38
		2.6%	57.6%	23.9%	15.9%	0.0%	100%
J	Automatización	0.07	1.64	0.68	0.45	0.00	2.84
		2.6%	57.6%	23.9%	15.9%	0.0%	100%
K	Imprevistos y contingencias	0.19	4.37	1.81	1.21	0.00	7.58
		2.6%	57.6%	23.9%	15.9%	0.0%	100%
	Total anual y gran total, mdp's	3.39	76.23	31.77	21.05	0.00	132.44
	Acumulado anual, mdp's	3.39	79.63	111.40	132.44	132.44	
	Total anual y gran total, %	2.6%	57.6%	24.0%	15.9%	0.0%	100%
	Acumulado anual, %	2.6%	60.1%	84.1%	100.0%	100.0%	

A continuación, se muestra de manera gráfica el monto de inversión anual para la implementación del Plan de Acciones en la PTAR Norte I y II:

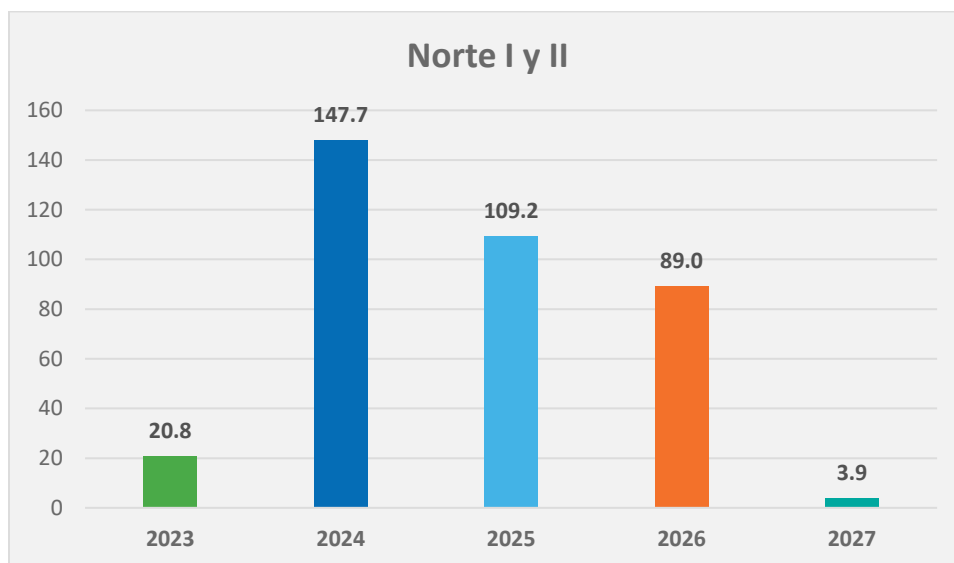


Figura 23 Distribución porcentual del monto de inversión por etapa de proceso y/o componente de proyecto

Bibliografía

CONAGUA. (2015). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. . México: CONAGUA.

GIZ, C. A. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Mexico: GIZ.

Metcalf & Eddy / AECOM. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery*. NY: McGraw-Hill.

US EPA. (1993). *Manual Nitrogen Control*. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency.

Financiado por



Co-implementado por



Co-ejecutado por



OEA | Más derechos para más gente

En alianza con



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

En colaboración con



