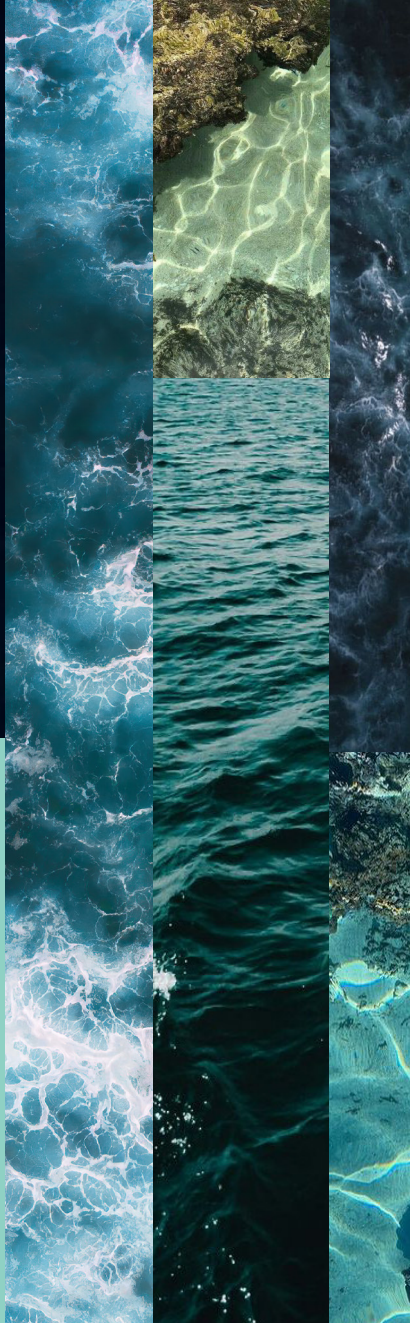




Tecnologías para el
**DESARROLLO DE UN
ESQUEMA INTEGRAL DE
TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES EN LA**
Península de Yucatán



**MEDIO
AMBIENTE**



Tecnologías para el DESARROLLO DE UN ESQUEMA INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA Península de Yucatán

AUTORES

J.M.Morgan-Sagastume*
Miriam Castro-Martínez**
Adalberto Noyola*

*Instituto de Ingeniería de la
Universidad Nacional Autónoma de
México)

**ELNSYST SA de CV (IBTech)

COORDINACIÓN

Liliana García Ramírez

REVISIÓN

Gonzalo Merediz Alonso
Liliana García Ramírez

DISEÑO EDITORIAL

Ilse Hernández Orozco

INSTITUCIONES

Comisión Centroamericana de
Ambiente y Desarrollo - CCAD

Secretaría de Medio Ambiente y
Recursos Naturales - SEMARNAT

Comisión Nacional de Áreas
Naturales Protegidas - CONANP

Amigos de Sian Ka'an, A.C.

Amigos de Sian Ka'an A.C.
Impreso en México, 2022.

Este documento ha sido posible gracias al apoyo del proyecto “Manejo integrado de la cuenca del arrecife de la ecorregión del Arrecife Mesoamericano”. Los contenidos de este documento son responsabilidad de Amigos de Sian Ka'an, A.C., y no reflejan necesariamente las opiniones de la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD), la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, y el Fondo Ambiental Mundial (GEF siglas en inglés)- Fondo para el Medio Ambiente Mundial. (WWF siglas en inglés).



Con la colaboración de:



PRÓLOGO

La humanidad se enfrenta a una inseguridad hídrica multidimensional que pone en riesgo el alcance del desarrollo sostenible. A pesar de los grandes avances alcanzados en las últimas décadas, persisten retos estructurales que impiden: tener acceso a agua potable en cantidad y calidad adecuadas y a un precio justo para que las personas solventen sus necesidades básicas de consumo, saneamiento, higiene y salud; aprovechar los ecosistemas de manera sustentable para que puedan seguir brindando sus servicios ambientales; asegurar un adecuado abastecimiento de agua para la producción de bienes y servicios; y fortalecer la resiliencia de la población ante los efectos relacionados con los fenómenos hidrometeorológicos extremos exacerbados por el cambio climático.

La pandemia por COVID-19 agravó en muchos lugares estos desafíos estructurales, imponiendo nuevos retos al sector hidráulico en su conjunto, que está obligado a garantizar el derecho humano al agua y al saneamiento en una situación de excepción, donde las demandas de agua se incrementan y los ingresos de los prestadores de servicios tienden a reducirse.

Esta crisis sanitaria evidenció con toda claridad que el acceso al agua potable en cantidad suficiente y calidad adecuada tiene el potencial

de salvar millones de vidas, y que para ello es necesario garantizar la operación ininterrumpida de los organismos encargados de la prestación del servicio. Sin embargo, hasta el momento, el agua y el saneamiento no ocupan una posición prioritaria en la agenda política internacional. Los retos del sector hídrico se enfrentan con una infraestructura hidráulica que, en general, ha rebasado su vida útil; con un financiamiento que experimenta un paulatino decremento de los niveles de inversión; y con un modelo de gobernanza que ha sido incapaz de incorporar los múltiples valores del agua en el diseño e implementación de una política hídrica justa, equitativa y sustentable.

Los retos estructurales y coyunturales del sector hídrico, y en particular los del saneamiento, requieren una solución efectiva urgente. Ello nos obliga a implementar acciones basadas en la innovación científica, tecnológica y social; a fomentar la vinculación entre los sectores académico, gubernamental, empresarial y de la sociedad organizada; y a repensar los paradigmas establecidos desde una óptica de ciencia de frontera. Este es justamente el espíritu del libro. Los autores presentan, dentro de un contexto general de mucho mayor alcance, una guía para los tomadores de decisiones sobre las tecnologías más adecuadas para el tratamiento

de aguas residuales en la Península de Yucatán. Se trata de un análisis bien documentado de los principales retos que históricamente ha enfrentado el saneamiento para dejar de ser visto como un sector de altos costos y pocos resultados; además, resalta las oportunidades que la incorporación de los enfoques del nexo agua-energía-alimentos y la economía circular ofrecen para transformar al saneamiento en un pilar del desarrollo sostenible, no solo en esta zona de estudio, sino a nivel global.

Para realizar este análisis, Morgan-Sagastume, Castro-Martínez y Noyola recurren a una zona geográfica particularmente compleja: la Península de Yucatán. La complejidad de su estudio desde el enfoque de saneamiento se deriva de su geología kárstica, cuyas propiedades físicas dificultan el desarrollo de sistemas de alcantarillado sanitario y presentan una alta permeabilidad que hace muy vulnerables a los depósitos de agua subterránea a la contaminación, tanto puntual como difusa. A esto se añaden prácticas culturales de disposición de desechos que dañan la calidad del agua de los acuíferos y que son incompatibles con el desarrollo de los principales polos turísticos de la

zona y la gestión sustentable de los ecosistemas. La guía plantea soluciones específicas al incremento exponencial de las fuentes de contaminación puntuales, en especial de las granjas porcícolas y de otros entes generadores de aguas residuales, así como a la intensificación de las fuentes de contaminación difusas. Para enfrentar estos desafíos, se pone especial énfasis en la implementación de trenes de tratamiento y en la generación de planes de manejo de aguas residuales que prioricen el reúso dentro de un esquema integral de economía circular.

Este trabajo es particularmente valioso porque realiza una evaluación de los recursos económicos necesarios para implementar las opciones tecnológicas sugeridas y cumplir así con las normas de descarga. Esta propuesta es, sin duda, el producto del trabajo coordinado de un grupo de investigadores orientados a fortalecer la interfaz ciencia-política para garantizar la seguridad hídrica.

Tengo la seguridad que esta guía se convertirá en una referencia obligada para todos los interesados en el tratamiento de aguas residuales desde una perspectiva integral e innovadora y, especialmente, para la Península de Yucatán.

DR. FERNANDO GONZÁLEZ VILLARREAL

DIRECTOR DEL CENTRO REGIONAL DE
SEGURIDAD HÍDRICA - UNESCO

COORDINADOR DE LA RED DEL AGUA UNAM

ÍNDICE

01 INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto	2
1.2 Estructura general de la guía	4

02 CONCEPTOS BÁSICOS

2.1 Definición de cuenca hidrológica e hidrográfica	8
2.2 El agua en una cuenca: su estudio, manejo, contaminación y reúso	10
2.2.1 Balance de Agua	10
2.2.2 Muestreo del agua	11
2.2.3 Calidad del agua	11
2.2.4 Normas que limitan las descargas de aguas residuales	16
2.2.5 Descargas de aguas residuales domésticas, municipales e industriales	30
2.2.6 Problemática con el uso de agroquímicos y su relación con la contaminación de una cuenca	40
2.2.7 Limpieza y desazolve de cuerpos de agua	46
2.2.8 Fuentes de información para caracterizar una cuenca para el manejo y control de la descarga de aguas residuales y tratadas	50

2.3 Aspectos generales a considerar para que funcione un esquema de saneamiento integral de una cuenca	52
2.3.1 Tiempos políticos	54
2.3.2 Transparencia en la información	55
2.3.3 Educación ambiental y capacitación para el tratamiento de las aguas residuales	56
2.3.4 Apoyo financiero decidido por parte de los tres órdenes de gobierno y esquemas tarifarios	59
2.3.5 Uso del agua tratada	62
2.3.6 Sobre los programas de apoyo federal	64
2.3.7 Sobre la participación del capital privado	67
2.3.8 Creación de un ENTE TÉCNICO que fortalezca los sistemas para el manejo del agua en la Península de Yucatán	69

03
CRITERIOS Y
RECOMENDACIONES
SOBRE LAS
TECNOLOGÍAS
Y PROCESOS DE
TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES

3.1 Características de la tecnología sustentable	74
3.2 Abanico de tecnologías existentes para sistemas biológicos y sistemas naturales contruidos	76
3.2.1 Sistemas Aerobios	77
3.2.2 Sistemas Anaerobios	82
3.2.3 Procesos acoplados Anaerobios-Aerobios	85
3.3 Remoción de Nutrientes	89
3.4 Tratamiento y manejo de lodos	91
3.5 Tratamiento y manejo de emisiones gaseosas	93
3.6 Oferta tecnológica en el mercado es en realidad limitada	95

04
SITUACIÓN
DEL MANEJO Y
TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES
EN LA PENÍNSULA DE
YUCATÁN

4.1 Situación hidrofisiográfica en la Península de Yucatán	98
4.1.1 Ríos y lagunas en la región	102
4.2 Situación del agua potable en la región	103
4.2.1 Usos del agua	103
4.2.2 Fuentes de abastecimiento y volumen de extracción	108
4.2.3 Cobertura de red de agua potable	114
4.2.4 Dotación de agua potable	116
4.3 Situación del manejo y tratamiento del agua residual	117
4.3.1 Cobertura de red de alcantarillado	117
4.3.2 Cobertura de tratamiento de agua residual	119
4.3.3 Descargas de aguas residuales y PTAR existentes	121
4.4 Aspectos socioeconómicos	142
4.4.1 Población por municipio	142
4.4.2 Economía	154
4.5 Descripción de la problemática	166
4.6 Resumen de visita y levantamiento técnico de siete plantas de tratamiento visitadas en el Estado de Quintana Roo	169

ÍNDICE

05 TECNOLOGÍAS ADECUADAS PARA LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

5.1 Características generales de las tecnologías	178
5.2 Acciones del Estado Mexicano en relación con la especificación de las tecnologías	182
5.3 Recomendación de tecnologías en función del sector productivo-comercial-municipal en la Península de Yucatán	185
5.3.1 Recomendaciones para el tratamiento preliminar y primario	191
5.3.2 Recomendación de trenes de tratamiento de aguas residuales para cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996 para descargas tipos A y B y la NOM-003-SEMARNAT-1997 con calidad para contacto directo	197
5.3.3 Recomendación de trenes de tratamiento de aguas residuales para cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996 para descargas tipo C y el proyecto de NOM-001-SEMARNAT-2021	210
5.3.4 Recomendación de trenes de tratamiento para casa habitación y/o entes generadores de aguas residuales con flujos muy pequeños	215
5.4 Análisis del costo de las tecnologías recomendadas para la península de Yucatán	220

06 ANÁLISIS, SELECCIÓN E INTEGRACIÓN DE OPCIONES DE SISTEMAS PARA LA CAPTACIÓN, CONDUCCIÓN, TRATAMIENTO Y REÚSO DE LAS AGUAS RESIDUALES

6.1 Definición de las variables involucradas para el análisis	246
6.2 Conceptualización del procedimiento de análisis en la cuenca	255
6.2.1 Plantas de tratamiento de aguas residuales centralizadas y descentralizadas	260
6.2.2 Manejo del agua de lluvia contaminada con agua residual	265
6.3 Desarrollo lógico del proceso de análisis de una cuenca mediante un algoritmo para la toma de decisiones	266

07

CONSIDERACIONES FINALES	287
--------------------------------	------------

08

GLOSARIO	290
-----------------	------------

09

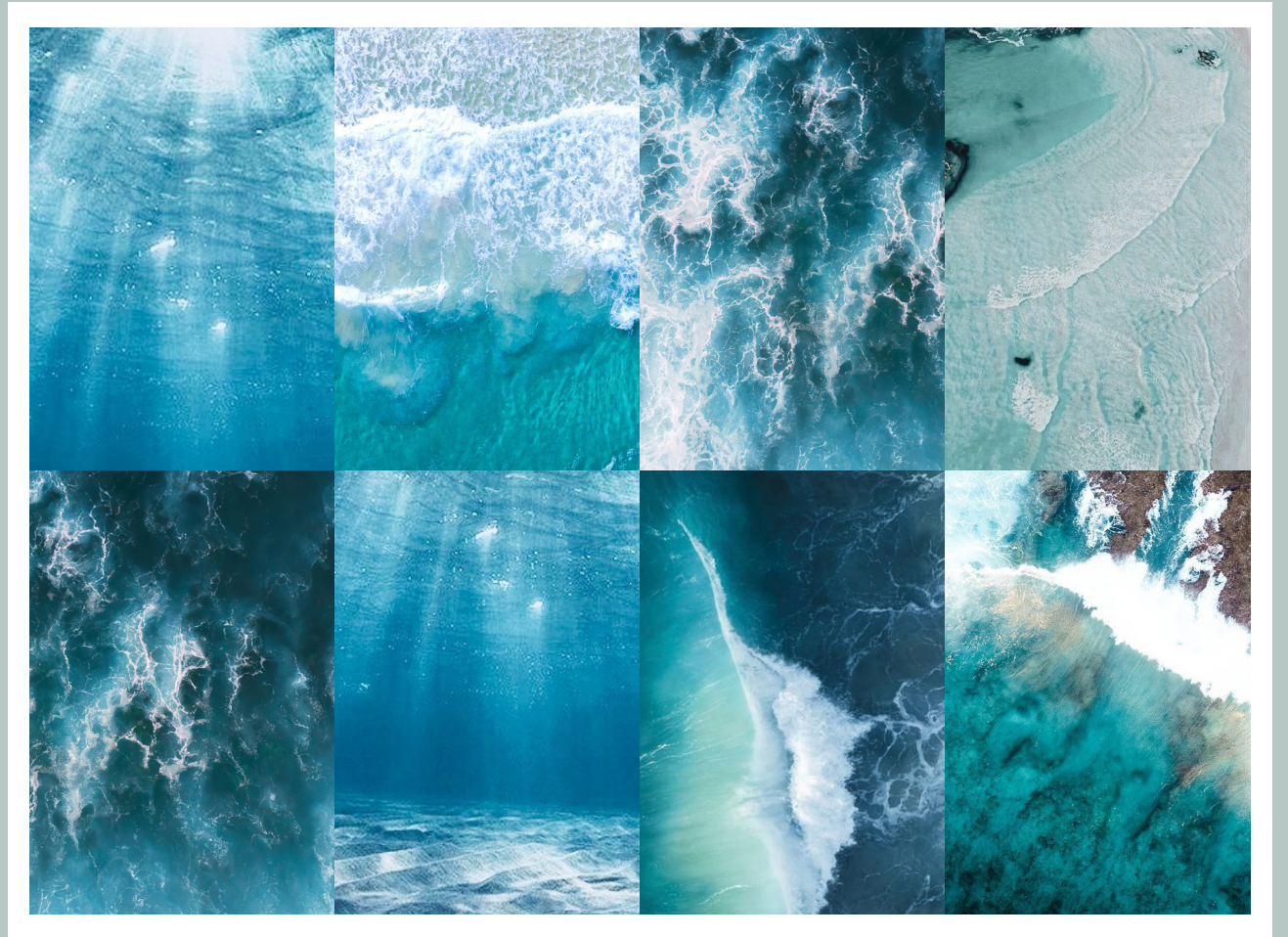
REFERENCIAS	298
--------------------	------------

10

ANEXOS	306
---------------	------------

INTRODUCCIÓN

introducción



CONTEXTO

El rezago en infraestructura de tratamiento de aguas residuales municipales en México y en particular en la Península de Yucatán es un asunto que no ha recibido la atención debida por parte de las autoridades competentes. Si bien en años recientes la inversión en este rubro ha tenido un ligero incremento, el atraso acumulado en varias décadas se mantiene.

En materia de abastecimiento de agua, ésta puede llegar al usuario en cantidad, más no en la calidad adecuada y no de forma continua. Por otro lado, el saneamiento, ya sea por alcantarillado o en el sitio, en la mayor parte de los casos no está asociado con la infraestructura para su tratamiento antes de su descarga al medio receptor. No existen estimaciones confiables del nivel de cobertura de tratamiento para las aguas residuales municipales en la región, pero se estima que no más del 2% del agua generada en la Península de Yucatán entra realmente a una planta de tratamiento (SEMARNAT 2012). El saneamiento que se realiza es básicamente de tipo individual, mediante la utilización de fosas sépticas.

Aunado a lo anterior, otro aspecto de alcance global que debe ser considerado en las políticas de inversión para la construcción de nueva infraestructura es el relacionado con la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y el cambio climático, tema reconocido como una de las más serias y potenciales amenazas ambientales que enfrenta la humanidad. En efecto, el manejo,

tratamiento y disposición de las aguas residuales contribuyen a la emisión de GEI a través de los procesos de descomposición de la materia orgánica contaminante y de las actividades asociadas.

Frente al tamaño del reto, y frente al sexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, es imperativo desarrollar e implantar nuevas soluciones, más sustentables, al eterno déficit en infraestructura para el manejo del agua residual, así como para ampliar y mejorar los sistemas de abastecimiento de agua.

Ante tal perspectiva, se abre una oportunidad para aplicar tecnologías de tratamiento de agua residual que atiendan mayormente el contexto específico de la región, que sean innovadoras, que cumplan con las legislaciones locales y federales y que presenten una menor huella de carbono. Bajo este contexto, los criterios de toma de decisiones para seleccionar la tecnología adecuada para un caso específico se amplían, debiendo integrar la sustentabilidad y la mitigación del cambio climático a los técnico – económicos convencionales (Noyola, A. et al., 2010).

ESTRUCTURA GENERAL DE *la guía*

Con el fin de contribuir al cambio necesario para alcanzar un desarrollo sustentable en la Península de Yucatán, esta guía busca ser una referencia para los responsables en la toma de decisiones en materia de tratamiento de aguas residuales, quienes deben contar con criterios para una adecuada elección de la tecnología y así resolver su problema de manejo de aguas residuales y, en general, para integrar un plan de manejo de las aguas residuales en una cuenca o zona de estudio.

La guía inicia presentando los conceptos mínimos necesarios a considerar para el adecuado manejo del agua residual en una cuenca relacionados con criterios de manejo sustentable. Posteriormente se comentan las características que deben tener las tecnologías a seleccionar para el tratamiento de las aguas residuales.

En un capítulo específico se comenta la situación general que priva en la Península de Yucatán en relación con el manejo del agua potable, cobertura de drenaje, tratamiento de aguas residuales y condiciones socioeconómicas en general. Con ello se plantean los retos que se tienen a la vista con relación a estos temas, como punto de partida y fundamento de las recomendaciones tecnológicas en materia de tratamiento de aguas residuales que se presentan.

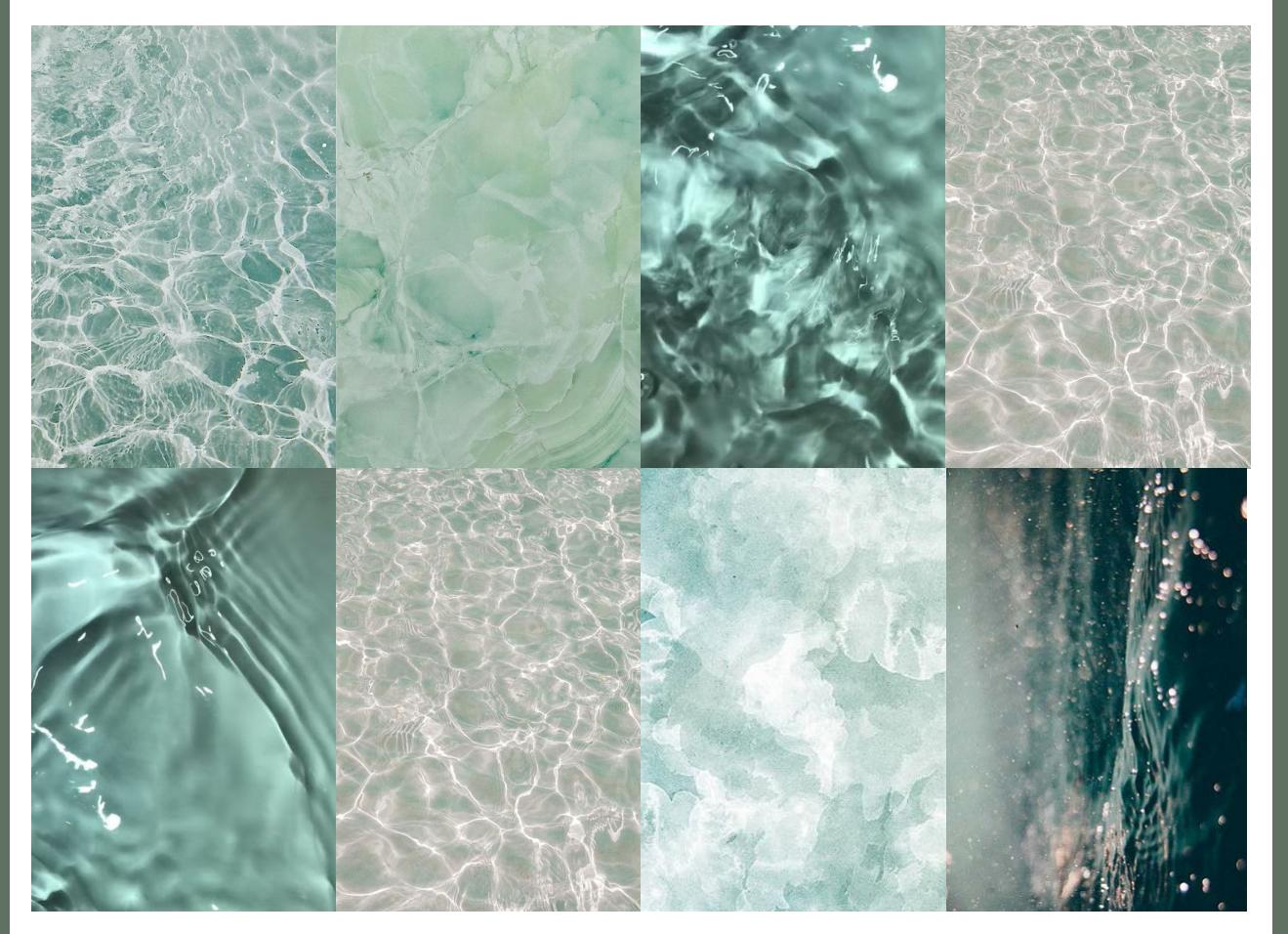
En siguientes capítulos se plantean recomendaciones tecnológicas para el tratamiento de las aguas residuales con el objeto

de dar cumplimiento a la normatividad vigente y a proyectos de modificación de las mismas en función de las actividades preponderantes en la región que tienen que ver con entes generadores de aguas residuales como son los municipios, hoteles, industria pecuaria e industria agroalimentaria en general. Se plantean a nivel conceptual trenes de tratamiento con una estimación de costos de inversión y operación con el objeto de apoyar con esta información la evaluación de factibilidad técnica económica de proyectos de inversión.

Por último, en la guía se desarrolla un procedimiento de análisis para el manejo del agua residual en una cuenca con un enfoque de reúso de agua para reducir la explotación del acuífero y evitar al máximo las descargas de aguas residuales crudas o deficientemente tratadas al ambiente, con el consecuente riesgo para el acuífero o cuerpos de agua receptores.

0 2 /
1 0

Conceptos BÁSICOS



DEFINICIÓN DE CUENCA HIDROLÓGICA

e hidrográfica

Una cuenca hidrográfica y una hidrológica se diferencian en que la primera se refiere exclusivamente a las aguas superficiales, mientras que la segunda toma en consideración las aguas subterráneas (acuíferos) caso que es muy particular en la Península de Yucatán. Una cuenca es entonces el espacio de territorio delimitado por la línea divisoria de las aguas, conformado por un sistema hídrico que conducen sus aguas a un río principal, a un lago o a un mar.

En la cuenca hidrográfica se encuentran los recursos naturales y la infraestructura creada por el humano, en las cuales desarrollan sus actividades económicas y sociales generando diferentes efectos favorables y desfavorables para su bienestar.

Existen cuencas abiertas (exorréicas), cerradas (endorréicas), criptorréicas y arréicas. Las exorréicas tiene una o más salidas de agua hacia un caudal mayor o hacia el mar (caso del río Usumacinta o el Lerma por ejemplo). Las endorréicas no tiene ninguna salida y por lo general da origen a un lago o laguna, si la impermeabilidad del suelo se lo permite para que infiltre el agua en exceso. Por ejemplo, la cuenca del valle de México y el lago de Pátzcuaro, en Michoacán.

Las cuencas criptorréicas fluyen subterráneamente, como sucede en la

Península de Yucatán, cuyos suelos cársticos permiten una infiltración casi inmediata de la lluvia (y de las aguas residuales) y la formación de corrientes subterráneas. Las cuencas arréicas son aquellas en que las aguas se evaporan o filtran en el terreno y no alcanzan a conformar un cuerpo de agua.

Los componentes principales que determinan el funcionamiento de una cuenca son los elementos biofísicos (atmósfera, clima, suelo y subsuelo, hidrología, flora y fauna) y los antrópicos (socio-económicos-culturales, infraestructura, tecnología, niveles de calidad de vida, creencias, conocimientos, sistemas de producción, tenencia de tierra, entre otros, demográficos y jurídico-institucionales (normas que regulan el uso de los recursos naturales, leyes, políticas de desarrollo, tenencia de las tierras, instituciones involucradas). Estos conforman diversos subsistemas: el biofísico, el social, el económico y el demográfico, los cuales interactúan definiendo a la cuenca hidrológica como un territorio que compone un sistema integral y sumamente complejo.

EL AGUA EN UNA CUENCA: SU ESTUDIO, MANEJO, CONTAMINACIÓN *y riesgo*

2 . 2 . 1 / BALANCE DE AGUA

La cantidad de agua que fluye en los arroyos, embalses y lagunas puede variar dependiendo de la temporada del año, de los ríos tributarios y de los desvíos artificiales que se encuentran aportando agua y extrayéndola de la cuenca hidrológica.

Un estudio hidrológico dará cuenta del ciclo del agua en la cuenca y se podrán estimar los aportes de agua de lluvia a los afluentes de los ríos. Ello es indispensable conocerlo para una evaluación integral del flujo de agua en la cuenca que implica el manejo de las aguas residuales y de lluvia contaminada en el área de estudio.

Por otra parte, el estudio hidrológico debe complementarse con un estudio hidráulico, con el que sea posible hacer predicciones de puntos de inundación en la cuenca en períodos de retorno largos y así planear la inversión en infraestructura para evitar tales eventos. Es recomendable medir y observar al menos lo siguiente:

- | *Una descripción sobre la variación de la cantidad de agua dentro de la cuenca y los factores principales responsables de ello.*

- | *Un informe sobre los usos de agua (desvíos artificiales) y del cambio de la cantidad de agua dentro de la cuenca.*
- | *Un mapa que muestre la capacidad de la carga del agua estimada en los arroyos durante las distintas temporadas del año, y*
- | *Una descripción sobre las extracciones de agua subterránea mediante el bombeo en pozos.*

2 . 2 . 2 / MUESTREO DEL AGUA

Los datos que se obtengan sobre la cuenca, proporcionan información general, una visión clara del cuerpo de agua, así como de las actividades y usos del suelo en esa área que pueden afectar la calidad del agua. La información tiene que ver con la cantidad y calidad del agua así como el estado visual de la cuenca en general.

2 . 2 . 3 / CALIDAD DEL AGUA

La calidad de agua se determina por sus características químicas, físicas, y biológicas.

Una evaluación de la calidad de agua podrá incluir comparaciones con los estándares, cálculos referidos a un índice de la calidad de agua, descripción de los contaminantes en bifurcaciones, fuentes de los contaminantes

y patrones de la calidad de agua dentro de un periodo de tiempo determinado. Es recomendable organizar la información por medio de:

- | *Tablas y gráficos de los datos de la calidad de agua para la cuenca,*
- | *Fotografías de las fuentes de contaminantes,*
- | *Descripción visual sobre la calidad de agua,*
- | *Una descripción sobre los usos designados para los cuerpos de agua dentro de la cuenca,*
- | *Una tabla o mapa mostrando los usos designados para las diferentes secciones de la cuenca,*
- | *Una tabla del criterio federal o estatal de la calidad de agua,*
- | *Una tabla o mapa que muestre las aguas contaminadas y los puntos de entrada de las mismas dentro de la cuenca, y*
- | *Una descripción sobre las aguas contaminadas dentro de la cuenca.*

El mapeo y llenado de formularios para adquirir datos de primera mano será indispensable para dar seguimiento técnico a los cambios que está sufriendo una cuenca. Esta información puede ser útil para ayudar a las autoridades locales a otorgar autorizaciones, emitir regulaciones o leyes que protejan los arroyos, humedales u otro cuerpo de agua que se encuentre en la zona y así propiciar un mejor control y mitigar los efectos del desarrollo poblacional e industrial. Para ello se pueden efectuar tres tipos de muestreos; el visual, el físico-químico y el biológico.

Muestreo VISUAL

Muchos de los contaminantes críticos del agua y la mayoría de daños al hábitat pueden ser detectados a través del muestreo visual. Se debe registrar la sedimentación, erosión, exceso de nutrientes y fugas de tuberías, cañerías o colectores. Es recomendable que se adjunten fotografías a la documentación; una imagen puede complementar o sustituir incluso el levantamiento de datos. Por ejemplo, pueden mostrar el proceso de erosión de orillas de ríos o lagos así como también la acumulación de sedimentos en un humedal.

Muestreo FÍSICO - QUÍMICO

Los parámetros mínimos recomendados a determinar son pH, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), oxígeno disuelto, temperatura, sólidos sedimentables, alcalinidad, fosforo total, Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK), nitrógeno oxidado (Nitritos y Nitratos) y conductividad y algunos metales o contaminantes prioritarios cuando ello aplique. En todo caso, hay que tener en cuenta la regulación y leyes que establecen los contaminantes a medir. Con ello se tendrá información cuantitativa sobre la evolución de la contaminación en el sitio.

Muestreo BIOLÓGICO

Ello conlleva la colección e identificación de organismos. Un muestreo biológico puede proveer de indicaciones confiables de la salud del arroyo o cuerpo de agua que se esté estudiando. Si el oxígeno disuelto es bajo o hubo un derrame de alguna sustancia tóxica o ha habido destrucción de hábitats en las vecindades, se verá reflejado en el tipo y número de organismos que se colecte. El coleccionar datos químicos, biológicos y visuales en función del tiempo brindará una visión más completa del estado de salud del cuerpo de agua en estudio, su estado actual y sus riesgos potenciales.

2 . 2 . 4 /

NORMAS QUE LIMITAN LAS
DESCARGAS DE AGUAS
RESIDUALES

De acuerdo con la reforma al artículo 4° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, publicada el 8 de febrero de 2012, toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. También establece la participación de los tres órdenes de gobierno y la sociedad misma para garantizar este derecho. El suministro de estos servicios es responsabilidad de los municipios con el concurso de los estados y la federación, de acuerdo con lo que establece el artículo 115 Constitucional.

La prestación de los servicios de suministro de agua potable y saneamiento en general en zonas urbanas es efectuada por los municipios mediante instancias que se denominan genéricamente “organismos operadores”, los cuales en su mayoría son entidades públicas dependientes de la administración municipal, salvo que exista de por medio un contrato de concesión. Sin embargo, en muchos casos, especialmente en ciudades medianas, los municipios prestan los servicios en forma directa a través de juntas de agua y saneamiento municipales.

Para un adecuado saneamiento de las aguas residuales es necesario asegurar su recolección, transporte, tratamiento y óptima disposición en los cuerpos receptores, en condiciones que no perjudiquen al medio ambiente y la salud de la población. A fin de lograr objetivos específicos, esta actividad debe traducirse en acciones concretas como la construcción, ampliación o modificación de las plantas de tratamiento, limitando las descargas directas a los cuerpos receptores naturales.

El darle tratamiento a un mayor volumen de aguas residuales también permite reducir la incidencia de enfermedades de origen hídrico, contribuyendo a crear y fortalecer un medio armónico de convivencia entre la población y la naturaleza. Los beneficios de contar con agua de calidad son innumerables, por esta razón, el Estado Mexicano ha creado un marco jurídico que se encarga de regular las descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores a través de las siguientes normas que están, en alguna medida, relacionadas entre sí:

NORMAS OFICIALES

mexicanas

NOM-001-SEMARNAT-1996,

Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicada el 6 de enero de 1997.

NOM-002-SEMARNAT-1996,

Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada el 3 de junio de 1998.

NOM-003-SEMARNAT-1997,

Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Publicada el 21 de septiembre de 1998.

NOM-004-SEMARNAT-2001,

que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final. Publicada el 15 de agosto de 2003.

NOM-014-CONAGUA-2003,

Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.

NOM-127-SSA1-1994,

"Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

NOM-003-SEMARNAT-1997,

que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Publicada el 21 de septiembre de 1998.

NOM-004-SEMARNAT-2001,

que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final. Publicada el 15 de agosto de 2003.

A su vez existen estos dos importantes proyectos modificatorios a tomar muy en cuenta:

**PROYECTO DE MODIFICACIÓN
DE LA NORMA OFICIAL
MEXICANA
NOM-001-SEMARNAT-1996,**

Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (13 de diciembre del 2017)

**PROYECTO DE NORMA OFICIAL
MEXICANA
PROY-NOM-127-SSA1-2017**

Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua (DOF 6 de diciembre del 2019)

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 es la norma eje a la que hacen referencia las NOM-002- SEMARNAT -1996 y la NOM-003- SEMARNAT -1997. En el texto de dicha norma no se hace referencia a descargas en suelos de tipo cárstico.



FIGURA 1.1 DISTINTAS CALIDADES DE AGUA EN FUNCIÓN DE SU NIVEL DE TRATAMIENTO (FUENTE II-UNAM)

El PROYECTO de actualización de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, publicado el 13 de diciembre del 2017 en el Diario oficial de la Federación, de aprobarse, implicaría un incremento en los niveles de restricción de los parámetros físico-químicos a cumplir (tanto los que rigen para materia orgánica como para nutrientes), así como los relacionados con algunos parámetros biológicos. Ello implicaría la modificación o rehabilitación de las plantas existentes para que estén en condiciones de cumplir con la norma y, para las plantas de tratamiento nuevas, tomar en consideración los nuevos valores de los parámetros, lo que conlleva a plantas más grandes, complejas y especializadas.

Por otra parte, aunado a lo anterior, se requiere incrementar el nivel de especialización de los laboratorios acreditados. Para ambos casos, se prevén inversiones en el sector que pudieran tardar varios años en concretarse.

En el texto del proyecto modificatorio de la norma NOM.001.SEMARNAT-1996 se establece lo siguiente:

“ ”

Que los ecosistemas cársticos tienen un elevado valor de uso por su contribución en el abastecimiento de agua, por sus formaciones naturales características que los hacen atractivos para la actividad turística proveyendo empleo e ingresos para la población local y por constituir un hábitat de flora y fauna endémicas. Sin embargo, la característica permeable y de rápida filtración de sus rocas hace que este ecosistema sea muy vulnerable a la contaminación proveniente de las descargas de aguas residuales y a la contaminación directa de los acuíferos

“ ”

El responsable de las descargas de aguas residuales en humedales y suelos cársticos debe cumplir con las condiciones particulares de descarga que establezca la Comisión Nacional del Agua

Es decir, derivado de este último párrafo, se concluye que la Comisión Nacional del Agua deberá especificar Condiciones Particulares de Descarga que podrán precisar valores de parámetros físico-químicos y biológicos al menos en los límites que estipula la norma.

La Norma Oficial Mexicana NOM-002- SEMARNAT -1996, aunque es de carácter federal, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, los cuales no son competencia de la federación, sino del municipio en cuestión, por lo que su aplicabilidad se ve limitada y recae en el ámbito municipal. El estado deberá legislar para limitar tales descargas, siempre observando la Norma Oficial Mexicana NOM-002- SEMARNAT -1996; es decir, en lo posible puede publicar normas más restrictivas, pero no con menor alcance a la NOM-002- SEMARNAT -1996 en sus parámetros ni en sus valores.

Los municipios deben tomar en cuenta que los límites máximos permisibles para los parámetros DBO5 y SST, que debe cumplir el responsable de la descarga a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, son los establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, o los especificados en alguna condición particular de descarga. El municipio deberá observar que al menos se descarguen aguas residuales tratadas con la misma calidad de agua que conduce el drenaje para no afectar la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales municipales que debe estar instalada al final del drenaje.

La Norma Oficial Mexicana NOM-003- SEMARNAT -1997 restringe los valores de DBO5 y SST así como algunos parámetros relacionados con el control de patógenos para asegurar agua tratada de calidad para distintas actividades de reutilización en servicios al público, predominantemente en medio urbano. Esta norma también hace referencia a la NOM-001-SEMARNAT-1996, en el sentido de que no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en ella.

Es muy importante considerar que cualquier planta de tratamiento de aguas residuales generará lodos de desecho, no existe planta que no lo haga pues violaría la primera ley de la termodinámica (conservación de la masa y la energía). En función de la calidad de lodo generada se tendrá que observar y cumplir con la NOM-004- SEMARNAT -2001 y disponer de los lodos tratados como biosólidos.

La recarga artificial, o gestionada, de acuíferos es una práctica que se aplica con diferentes objetivos; los más comunes son: atenuar efectos de sobreexplotación, tales como abatimiento de los niveles del agua, asentamientos del terreno o intrusión salina, dar tratamiento natural al agua en el subsuelo, manejar los acuíferos como vasos de almacenamiento y regulación, y utilizar el subsuelo como una red natural de acueductos, caso propio de los suelos cársticos en la Península de Yucatán.

Desde el punto de vista técnico, la factibilidad de la recarga artificial depende, entre otros factores, de que exista agua disponible para tal fin y de que

ésta sea de calidad tal que no deteriore la calidad del agua subterránea nativa o que sea factible su tratamiento para prevenir riesgo de contaminación. Para ello existe la NOM-014-CONAGUA-2003 la cual, en su texto, hace referencia a la NOM-127-SSA1-1994 (y por tanto hay que considerar también su proyecto modificadorio: PROY-NOM-127-SSA1-2017) para definir la calidad que debe tener el agua (agua con calidad tipo potable) para la infiltración de agua tratada al subsuelo con fines de recarga.

Lo anterior, supone prácticamente la potabilización del agua residual, lo que implica plantas de tratamiento complejas y con alto nivel de inversión. Esto es lo que se debería cumplir, visto solamente desde una perspectiva meramente técnica, para el caso de la Península de Yucatán por el tipo de suelo que posee, lo cual se antoja poco probable derivado de las condiciones económicas y sociales de la región, por lo que el enfoque del manejo de las aguas tratadas debe estar orientado, predominantemente, al reúso del agua.

“ ”

No se permite la construcción de SRA (Sistemas de Recarga Artificial) en los casos siguientes:

A

En terrenos donde las características físico-químicas del suelo o del agua subterránea, hayan sido degradadas a causa de un evento previo de contaminación, aun cuando se hayan aplicado medidas de saneamiento.

B

En terrenos que, por carecer de una cobertura edáfica y por predominar en el subsuelo rocas cársticas, fracturadas, o clásticos de grano grueso, no tengan capacidad para eliminar o atenuar los contaminantes presentes en el agua de recarga. Esta condición aplica únicamente a SRA de tipo Superficial y Subsuperficial

“ ”

Para los fines de la presente Norma Oficial Mexicana, los tipos de recarga artificial se clasifican como sigue:

Superficial

Consiste en la recarga desde la superficie por infiltración en obras como: estanques o piletas de infiltración, inundación del terreno, cauces acondicionados, zanjas, sobreirrigación o una combinación de ellas;

Subsuperficial

Consiste en la introducción del agua en la zona no saturada mediante pozos secos, zanjas o estanques profundos, y

Directo

Consiste en la introducción directa del agua al acuífero por medio de pozos cuya sección abierta lo penetran parcial o totalmente

La Comisión Nacional del Agua es la facultada para definir las condiciones particulares de descarga para cada caso en particular, las cuales estarán entre lo que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la más estricta norma NOM-014-CONAGUA-2003.

Por otra parte, es conveniente saber que, aunque técnicamente es posible, no se permite en el país potabilizar agua para consumo humano directo a partir de aguas residuales aun cuando se dé cumplimiento a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, debido al riesgo que supondría una eventual inadecuada operación de las plantas. Para algunos casos en donde se desea reutilizar el agua para actividades industriales específicas es posible que se solicite el cumplimiento de dicha norma y para ello se llamará agua “Tipo Potable”.

2 . 2 . 5 /**DESCARGAS DE AGUAS
RESIDUALES DOMÉSTICAS,
MUNICIPALES E INDUSTRIALES**

A grandes rasgos, las fuentes de contaminación del agua se pueden clasificar en dos grupos, las fuentes puntuales y las no puntuales. La contaminación por fuentes no puntuales es la principal causa de los problemas de la calidad del agua en muchas cuencas, por ejemplo la contaminación por actividades agropecuarias. Ello es producido por la lluvia que diluye y transporta los contaminantes sobre y a través del suelo. De esta forma, los contaminantes naturales y aquellos producidos por actividades agropecuarias, terminan depositándose finalmente en los lagos, ríos, humedales, aguas costeras y aguas subterráneas, siendo este último caso de especial importancia en la Península de Yucatán derivado el tipo de suelo que posee.

Un componente importante para el control de la contaminación por fuentes no puntuales, es el entendimiento de la dinámica de la cuenca y cómo influye en la calidad del agua.

Las fuentes puntuales, como las descargas de aguas residuales (tratadas o sin tratar), son más fáciles de controlar por su ubicación. Se dan cuando existen redes de drenaje o bien una industria o actividad agroindustrial intensiva.

En la Tabla 1.1, se resumen las principales fuentes de contaminación del agua en una cuenca así como los impactos negativos asociados con ello.



FIGURA 1.2 DESCARGA PUNTUAL DE AGUA RESIDUAL A UN RÍO (FUENTE: II-UNAM)

TABLA 1.1. PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN UNA CUENCA HIDROLÓGICA Y SUS IMPACTOS NEGATIVOS

CONTAMINANTES	Sedimentos (arena, arcilla y barro)	Materia orgánica
POSIBLES FUENTES (ENUNCIATIVAS NO limitativas)	-Sembradíos -Actividades forestales -Pastizales -Construcción -Carreteras -Operaciones mineras -Operaciones ganaderas	-Excretas humanas y de animales. -Materia en descomposición de plantas y animales. -Basura y desechos de productos alimenticios -Descarga de agua residual pobremente tratada o sin tratar
POSIBLES IMPACTOS AL MEDIO AMBIENTE de la cuenca	La sedimentación puede destruir el hábitat para la vida acuática, al acabar con las áreas de desove y alimentación de peces, eliminar organismos que son fuente de alimento, pueden causar abrasiones en las agallas y descomposición de las aletas de los peces. Reduce la penetración del sol a través del agua, lo que impide la fotosíntesis. Los sedimentos suspendidos disminuyen el valor recreacional, desgasta las bombas mecánicas y otro equipo de distribución del agua y le agrega costo al tratamiento del agua. Los nutrientes y sustancias tóxicas adheridas a las partículas de sedimento pueden interferir en las cadenas alimenticias acuáticas.	La descomposición natural de la materia orgánica biodegradable consume el oxígeno disuelto en los cuerpos de agua. El oxígeno disuelto puede reducirse a concentraciones por debajo del necesario para mantener la vida acuática y producir condiciones anaerobias en los cuerpos de agua. Bajo esta condición se genera metano (gas de efecto invernadero) y H2S, un compuesto tóxico y causante de malos olores. Así mismo se eleva la concentración de nitrógeno amoniacal en el medio con el efecto tóxico esperado.

CONTAMINANTES

POSIBLES FUENTES
(ENUNCIATIVAS NO
limitativas)

POSIBLES IMPACTOS
AL MEDIO AMBIENTE
de la cuenca

Patógenos (Cisticercos, bacterias y virus)

- Excretas humanas y animales.
- Descargas de aguas residuales municipales sin tratar o mal tratadas
- Operaciones de producción animal.
- Sembradíos o pastizales abonados con estiércoles.
- Plantas de tratamiento de agua mal operadas.
- Esgurrimiento urbano.
- Fauna muerta en estado de descomposición.

Hay varias enfermedades gastrointestinales que se transmiten a los humanos por medio del contacto directo o indirecto con agua contaminada.

La principal preocupación tanto en aguas superficiales como subterráneas es la potencial degradación de las fuentes públicas de agua potable. Cuando hay patógenos presentes en un lago o en otro cuerpo de agua es posible que se deban limitar las actividades recreacionales en el mismo y ser considerado con reservas como una fuente primaria para la potabilización del agua.

Nutrientes (fósforo, nitrógeno)

- Erosión y escurrimiento de agua en los campos fertilizados.
- Esgurrimiento urbano.
- Descarga de aguas residuales de origen municipal sin tratar.
- Plantas de tratamiento de aguas residuales en mal estado o que no cumplen con la eliminación de nutrientes.
- Descargas industriales sin tratar.
- Sembradíos o pastizales abonados.

La descarga de nutrientes a los cuerpos de agua puede causar un crecimiento excesivo de plantas, lo que puede consumir el oxígeno (principalmente por la descomposición de plantas muertas y algas) además de obstruir el ingreso de la luz solar al cuerpo de agua lo cual interfiere con la oxigenación del mismo al evitar la fotosíntesis. Los peces y otros organismos acuáticos se ven afectados, así como la pesca y la navegación. El sabor y el olor del agua potable pueden ser inadecuados.

El agua potable contaminada con nitrógeno (nitratos) puede causar metahemoglobinemia en lactantes y también forzar a que se clausuren las fuentes primarias de agua.

Por otra parte, la presencia de amonio puede generar productos carcinógenos al clorar el agua potable (Nitrosaminas, cloraminas) además de demandar mayor cantidad de cloro para la desinfección en los procesos de potabilización del agua.

CONTAMINANTES	Pesticidas Sustancias tóxicas (metales pesados, aceites, compuestos orgánicos e inorgánicos volátiles y subproductos del petróleo en general).	pH (aguas ácidas y alcalinas)
POSIBLES FUENTES (ENUNCIATIVAS NO limitativas)	Escurremientos en donde se usan pesticidas (bosques, pastizales, áreas urbanas y suburbanas, jardines). Escurreimiento de agua urbana. Agua de riego. Descargas industriales.	- Escurreimiento de minas - Descargas industriales.
POSIBLES IMPACTOS AL MEDIO AMBIENTE de la cuenca	Los pesticidas pueden ingresar a las aguas superficiales o subterráneas en forma disuelta en escurreimientos o adheridos a sedimentos y material orgánico. El mayor impacto a atender en las aguas superficiales es que entren en la cadena alimenticia y provoquen bioacumulación de compuestos prioritarios con efectos tóxicos en peces, fauna y humanos. Provocan la degradación de las fuentes públicas de agua potable, superficiales y subterráneas.	Las aguas ácidas o alcalinas pueden afectar muchos procesos biológicos. Un bajo pH o condición ácida puede afectar la reproducción y el desarrollo de peces y anfibios, y disminuir la actividad microbiana que es importante para el ciclo de nutrientes. Un pH extremadamente bajo matará toda la vida acuática. Las condiciones ácidas también pueden provocar la liberación de metales tóxicos que fueron adsorbidos por sedimentos. Un pH alto, o condiciones alcalinas, pueden causar intoxicaciones por amoníaco en los organismos acuáticos.

CONTAMINANTES	Modificaciones estructurales al hábitat.	Escombros, basura de todo tipo, residuos sólidos.
POSIBLES FUENTES (ENUNCIATIVAS NO limitativas)	Canalizaciones de agua. Construcción de todo tipo. Cambio en los usos del suelo. Dragados. Eliminación de la vegetación. Modificaciones a las orillas de los arroyos y ríos.	Basura Tiradero ilegal de desechos sólidos
POSIBLES IMPACTOS AL MEDIO AMBIENTE de la cuenca	Las modificaciones al hábitat incluyen cambios en el paisaje en el cuerpo de agua, que alteran la dinámica hidrológica, la estructura física y ambiental del ecosistema acuático y ripario.	Escombros y basura en un arroyo pueden bloquear las áreas de desove de los peces, producen estrés a organismos acuáticos, reducen la claridad del agua; dificultan el tratamiento del agua en plantas e impiden los usos recreacionales del cuerpo de agua, tales como la natación, pesca y navegación. Generación de lixiviados que se depositan en los cuerpos de agua.

2 . 2 . 6 /

PROBLEMÁTICA CON EL USO DE
AGROQUÍMICOS Y SU RELACIÓN
CON LA CONTAMINACIÓN DE UNA
CUENCA

La contaminación de las aguas procedentes de fuentes no puntuales es resultado de un amplio grupo de actividades humanas en las que los contaminantes no tienen un punto centralizado y definido de ingreso en los cuerpos de agua que los reciben. El hecho de que sean fuentes de descargas no puntuales, responden a las condiciones hidrológicas y, por ello, hace que sean mucho más difíciles de identificar, medir y controlar.

Los tipos de prácticas agrícolas y formas de utilización de la tierra, incluidas las operaciones de alimentación animal no industrializadas (granjas de engorde de traspatio o en terrenos abiertos), se consideran como fuentes no puntuales. Los contaminantes de procedencia no puntual, cualquiera que sea la fuente, se desplazan por la superficie terrestre o se infiltran en el suelo, arrastrados por el agua de lluvia. Estos contaminantes consiguen abrirse paso hasta las aguas subterráneas, cuerpos de agua superficiales, tierras húmedas y, finalmente, hasta los océanos en forma de sedimentos y cargas químicas transportadas por los ríos.

Los agroquímicos y sus subproductos encierran un considerable riesgo toxicológico; el ingreso de los agroquímicos en el agua subterránea y cuerpos de agua superficiales genera un alto riesgo para la salud humana y animal y la biota en general al ser el agua empleada para consumo como potable, riego y/o actividades de recreo.

Para el control de las fuentes no puntuales, en particular en la agricultura, se debe recurrir, ante todo, a iniciativas de educación, promoción y legislación de prácticas adecuadas de ordenación y modificación del aprovechamiento de la tierra.

En la Tabla 1.2, se muestran los efectos contaminantes relacionados con esta actividad.

TABLA 1.2. EFECTOS CONTAMINANTES RELACIONADOS CON LA AGRICULTURA

LABRANZA/ARADO ACTIVIDAD	CONTAMINANTE Sedimentos/turbidez: los sedimentos transportan fósforo y plaguicidas adsorbidos a las partículas de los sedimentos. EFEECTO Sedimentos/turbidez: los sedimentos transportan fósforo y plaguicidas adsorbidos a las partículas de los sedimentos.	APLICACIÓN DE ESTIÉRCOL ACTIVIDAD	CONTAMINANTE Aporte de nutrientes, materia orgánica y organismos patógenos. EFEECTO Esta actividad se realiza como sustituto a los fertilizantes sintéticos; provoca en las aguas receptoras elevados niveles de contaminación por agentes patógenos, metales, fósforo y nitrógeno, lo que da lugar a la eutrofización.
APLICACIÓN DE FERTILIZANTES ACTIVIDAD	CONTAMINANTE Aporte de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo. EFEECTO La inserción por lluvia o riego, acelera la eutrofización y produce mal gusto y olor en el abastecimiento público de agua, crecimiento excesivo de flora acuática que da lugar a desoxigenación del agua y mortandad de peces. Lixiviación del nitrato hacia las aguas subterráneas.	TALA ACTIVIDAD	CONTAMINANTE Erosión de la tierra, producción de sedimentos lo que da lugar a elevados niveles de turbidez en los ríos, entarquinamiento del hábitat de aguas profundas, etc. EFEECTO Perturbación del régimen hidrológico, muchas veces con incremento de la escorrentía superficial y disminución de la alimentación de los acuíferos; influye negativamente en el agua superficial, ya que reduce el caudal durante los periodos secos y concentra los nutrientes y contaminantes en el agua superficial.

APLICACIÓN DE PLAGUICIDAS ACTIVIDAD

CONTAMINANTE

Compuestos órgano clorados (ej.: DDT, aldrín), organofosforados (ej.: temefos), piretroides (ej.: cipermetrina y del tametrina), para el control de enfermedades transmitidas por vectores que representan serios problemas para la salud de la población.

EFEECTO

La utilización de plaguicidas da lugar a la contaminación del agua superficial y la biota; disfunción del sistema ecológico en las aguas superficiales por pérdida de los depredadores superiores debido a la inhibición del crecimiento y a los problemas reproductivos; consecuencias negativas en la salud pública debido al consumo de pescado contaminado. Los plaguicidas son trasladados en forma de polvo o aerosoles por el viento hasta distancias muy lejanas. Algunos plaguicidas pueden lixiviarse en las aguas subterráneas, provocando problemas para la salud humana a través de los pozos contaminados.

Las decisiones que deben adoptarse en el sector de la agricultura para combatir la contaminación debida a fuentes agrícolas no puntuales dependen de factores muy locales, como el tipo de cultivos y las técnicas de aprovechamiento de la tierra, en particular la utilización de fertilizantes y plaguicidas. El objetivo debe ser multiplicar la rentabilidad económica de los agricultores sin olvidar la protección del medio ambiente natural y social. En un sentido general se debe atender lo siguiente:

| *Desarrollar de un programa de monitoreo ambiental para la calidad del agua en cuerpos de agua subterráneos y superficiales.*

| *Prohibir el uso de plaguicidas/fertilizantes altamente contaminantes y que no respondan a las necesidades y requerimientos productivos y ambientales del país. Favorecer aquellos que sean amigables con el medio ambiente y de origen natural. Usar preferentemente enemigos biológicos naturales y endémicos para combatir las plagas sin dañar el ambiente.*

| *Evitar la tala inmoderada de bosques y quema indiscriminada de pastizales, para proteger el suelo de la erosión.*

| *Alternar diferentes cultivos para disminuir la degradación del suelo.*

2 . 2 . 7 /

LIMPIEZA Y DESAZOLVE DE
CUERPOS DE AGUA

En el caso específico de nuestro país, una de las especies vegetales acuáticas que mayor daño produce es *E. Crassipes* (lirio acuático) provocando serios problemas en muchos embalses naturales y artificiales (Miranda et al., 1999). Su gran rapidez de crecimiento, su poder de propagación y su capacidad de adaptación obligan a considerarla como una plaga acuática.

En orden de importancia, las hidrófitas reportadas son: lirio acuático (*Eichhornia crassipes*), tule (*Typa spp*), carrizo (*Scirpus spp*), e hidrilla (*Hydrilla verticillata*). (Jiménez et al., 2010)

Dentro de los problemas económicos asociados con esta planta flotante, podemos citar las pérdidas de agua por evapotranspiración, el azolvamiento prematuro de embalses, la limitación de la actividad pesquera y recreativa, la obstrucción de canales de riego y de tomas en plantas hidroeléctricas y la operación de obras hidráulicas. Dentro de los problemas ecológicos, la acumulación de grandes cantidades de plantas provoca el estancamiento de agua, disminuyendo



FIGURA 1.3 ACUMULACIÓN DE LIRIO
ACUÁTICO EN LA PRESA VALSEQUILLO,
PUEBLA, 2014 (FUENTE II-UNAM)

el oxígeno disuelto y, por consiguiente, la muerte de especies acuáticas. Dentro de los problemas de salud, las malezas acuáticas constituyen el hábitat para el desarrollo de mosquitos vectores de enfermedades como el dengue (*Aedes aegypti*), la malaria (*Stephensis malaria*) y la filariasis (*Culex quinque fasciatus*), así como caracoles transmisores de *Schistosoma* sp.

De los tres métodos de control comúnmente empleados (mecánico, químico y biológico), el mecánico parece ser el más eficiente por costeable, rápido y ambientalmente sustentable. Por supuesto, eso invalida el control químico, porque éste requiere siempre mucho mayor cuidado en el manejo como en la selección de los herbicidas. El método biológico de control no se puede recomendar aislado: debe utilizarse en combinación con alguno de los otros, ya que sus resultados son muy lentos.

Hay que evitar triturar o picar el lirio o la maleza dentro del mismo cuerpo de agua para evitar el depósito de la materia picada en el fondo del cuerpo de agua.

Uno de los retos más importantes que se plantea cuando se efectúa la limpieza de maleza en los cuerpos de agua es el qué hacer para disponer adecuadamente lo extraído del cuerpo de agua a un bajo costo. Para ello se han planteado opciones como la codigestión anaerobia, el composteo, como forraje, como elementos biológicos (sistemas naturales contruidos) para el tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad de absorción de compuestos tóxicos y metales, así como para la elaboración de artesanías o inclusive confinarlo en relleno sanitario o incinerar la biomasa.

Cada opción o un conjunto de ellas deberán analizarse bajo un contexto definido para determinar su viabilidad ambiental y económica.

2 . 2 . 8 /

FUENTES DE INFORMACIÓN PARA
CARACTERIZAR UNA CUENCA PARA
EL MANEJO Y CONTROL DE LA
DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES
Y TRATADAS

Las fuentes de información para caracterizar una cuenca pueden provenir de organizaciones oficiales y privadas que manejen datos estadísticos sobre los diversos temas involucrados en la cuenca y/o directamente al efectuar entrevistas, encuestas y caracterizaciones técnicas en campo. Otras fuentes lo constituyen las universidades, los periódicos, librerías, archivos históricos en general y consultores privados que den cuenta de actividades como la pesca, matanzas de peces, derrames, desbordes, del desarrollo residencial, de la canalización y desvío de ríos, cuando y como se construyeron los puentes y carreteras y cualquier otro evento mayor que pueda haber afectado a la cuenca.

En general se pretende recabar información sobre lo siguiente:

- | *Localización de los ríos, su longitud, su caudal, por dónde fluyen y en qué lugares se rebalsan.*
- | *Ubicación, jurisdicción y extensión territorial de las localidades.*

| *Nombre de los tributarios y cuencas con las que colinda, las poblaciones de la cuenca y las comunidades por las que fluyen los arroyos.*

| *Uso del suelo dentro de la cuenca.*

| *Usos históricos del suelo.*

| *Industrias que descarguen aguas residuales en el cuerpo de agua.*

| *Actividad agrícola y pecuaria en la región.*

| *Ubicación exacta de descargas de aguas residuales a cuerpos de agua y suelo.*

| *Usos actuales de los cuerpos de agua (pesca, natación, agua potable, fuente de agua, irrigación, etc.)*

| *Datos sobre precipitaciones, lluvias etc. que aporten información para el estudio hidrológico.*

| *Estudio hidráulico de cuerpos de agua superficiales y subterráneos*

| *Estudio topográfico de la cuenca*

| *Explorar las posibilidades de reúso de agua tratada en actividades municipales, agrícolas y/o industriales*

ASPECTOS
GENERALES A
CONSIDERAR
PARA QUE
FUNCIONE UN
ESQUEMA DE
SANEAMIENTO
INTEGRAL

de una cuenca

En cuanto a la gobernabilidad y problemática general en las cuencas se resaltan los siguientes aspectos:

| *Se percibe una escasa o casi nula influencia de los gestores de agua o responsables de la administración de las cuencas en las políticas macroeconómicas y en la asignación de recursos para el manejo de la cuenca por parte de estado.*

| *Falta de información, interés y capacidad de gestión por parte de los pobladores de la cuenca sobre sus derechos y obligaciones.*

| *Carencia de estrategias integrales y de planificación que considere a los distintos actores e interesados en la cuenca en su justa dimensión orientados a la protección ambiental de la misma y/o a su saneamiento.*

| *Falta de capacidad de negociación y/o coerción o simplemente carencia de la voluntad política por parte de las autoridades para aplicar la ley.*

| *Permitir por parte de las autoridades la operación de empresarios nacionales y extranjeros sin escrúpulos con poder económico y político que les permite contaminar a discreción y voluntad sin sufrir consecuencias legales de ningún tipo.*

| *Falta de información pública de carácter técnico sobre el estado ambiental de la cuenca. Hay cuencas en donde la capacidad de resiliencia es alta por lo que los pobladores no perciben los daños ambientales en el plazo inmediato.*

2 . 3 . 1 /**TIEMPOS POLÍTICOS**

Se refiere a la interferencia de los factores políticos en las decisiones técnicas que deben determinar y regular el funcionamiento de la cuenca.

Los períodos trianuales en el nivel de gobierno municipal, además de elevar los costos de aprendizaje, provocan una visión de gobierno de corto plazo que dificulta la implementación de políticas de largo plazo como lo requieren generalmente las políticas ambientales. Ocurren casos en que el gobierno saliente no comparte información técnica importante con el entrante por tratarse de partidos políticos contrarios.

En el caso de los gobiernos estatales, si bien cuentan con un periodo sexenal, la diferencia en los tiempos electorales de cada estado no coadyuva al acuerdo entre los gobiernos, ya que la diferencia en agendas y tiempos políticos hacen incompatibles en cierto grado la conformación y aplicación de programas ambientales. Esto puede complicarse al encontrar diferentes partidos políticos en los gobiernos estatales en conjunto con un marcado contraste de desarrollo económico y social de cada región.

2 . 3 . 2 /**TRANSPARENCIA EN LA INFORMACIÓN**

La generación de información técnica, administrativa, económica, ambiental y social confiable, transparente y asequible es uno de los más importantes indicios de una buena gestión del agua en una cuenca.

Sin duda, la falta de información es un obstáculo enorme para impulsar políticas públicas que conlleve a la mejora en la gestión del agua en una cuenca, al asociarse ello con opacidad e impunidad, ineficiencias y corrupción, muy limitada rendición de cuentas, y carencia de una verdadera cultura del agua.

2 . 3 . 3 /

EDUCACIÓN AMBIENTAL Y CAPACITACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

Aspecto muy importante, pero no es el único factor que contribuye, al problema ambiental en una cuenca como se tiende a manejar en distintos sectores de la sociedad. Es fundamental enseñar a la población, particularmente a los niños, la importancia de cuidar los recursos naturales con una visión a largo plazo. Los programas de culturización deben ser continuos, concertados, y deben unir a todos los sectores de la sociedad con un objetivo y un beneficio común, para atacar el problema de raíz.

La enseñanza en materia de tratamiento de aguas residuales debe ser apoyada considerando, entre otros aspectos, lo siguiente:

| *Desarrollar las capacidades de los maestros en el ámbito de la educación básica para que integren y visualicen la importancia de la relación Salud-Agua-Ambiente-cambio climático-nutrición-producción de alimentos.*

| *Impulsar por parte del estado mexicano la investigación y la gestión de conocimiento en procesos educativos con los temas relacionados con el agua.*

| *Diseñar material didáctico y lúdico especializado y que responda a la realidad territorial para sensibilizar a la población, que además permita la apropiación del conocimiento y facilite un cambio de comportamiento en el sentido de aceptar y cuidar el recurso agua en general. Ello conlleva también, en sí, la sensibilización para aceptar el pago por el servicio de suministro de agua y su saneamiento.*

| *Fomentar, dentro del proceso educativo, la formación de redes, espacios intersectoriales (la Secretaría de Salud, la Secretaría de Educación Pública), por ejemplo y aliados estratégicos, ONG, fundaciones, cooperaciones y entes de participación ciudadana (asociaciones de padres de familia, por ejemplo).*

| *Mejorar la infraestructura en las escuelas y gestionar la construcción de plantas de tratamiento en las mismas, que además de tratar el agua residual, permita la intervención adecuada y segura de los estudiantes en cuanto a su operación y mantenimiento de las mismas para facilitar y apoyar el proceso de aprendizaje.*

Alinear los temas educativos en materia de gestión y tratamiento de aguas residuales con las tecnologías que convenga aplicar en el ámbito de un municipio en específico o de una región o inclusive de una localidad, en un esfuerzo de transferencia de conocimiento concertado entre la SEMARNAT, SEP y SSA entre otros.

Tomar en cuenta la especialización del personal requerido para operar una planta de tratamiento de aguas residuales, sobre todo en regiones donde sea difícil contar con técnicos calificados. Se recomienda favorecer aquellas tecnologías que no demanden una alta especialización para su arranque y operación y, en el caso de requerirse, asegurar su permanencia en el empleo de este personal clave.

Al respecto, un punto a considerar es la rotación de personal operador, que debe ser limitada en lo posible. La capacitación a través de la experiencia que un trabajador puede lograr con el tiempo es muy valiosa para la planta de tratamiento en particular y debe ser conservada. El proporcionar condiciones laborales adecuadas es una medida necesaria para evitar este problema; lo mismo aplica para el personal gerencial y administrativo.

2 . 3 . 4 /

APOYO FINANCIERO DECIDIDO POR PARTE DE LOS TRES ÓRDENES DE GOBIERNO Y ESQUEMAS TARIFARIOS

Se requieren programas efectivos en los tres órdenes de gobierno que apoyen financieramente a los organismos operadores de agua y que aseguren con ello la operatividad de los mismos, aunado a esquemas y programas tarifarios que autofinancien su operación.

Los directivos y mandos medios de los sistemas operadores son muy vulnerables a los vaivenes políticos, las capacidades gerenciales son escasas y se pierden de manera periódica, el financiamiento se reduce y el personal capacitado se va alejando de un sector que no le ofrece perspectivas de desarrollo, crecimiento y estabilidad laboral.

La mayoría de los programas de apoyo federal, en lo fundamental, tienen en común un apoyo económico para la inversión y construcción de nueva infraestructura o rehabilitación de la misma pero no para los costos derivados de la operación y mantenimiento de dicha infraestructura que lo sustenten durante toda su vida útil. Es común encontrar plantas de

tratamiento de aguas residuales sin operar debido a que fundamentalmente no hay condiciones financieras para mantenerlas. Es importante promover un financiamiento adecuado orientado en particular a la operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento.

Mientras el usuario de los servicios de agua tenga acceso fácil y económico al agua, entre otros factores que influyen en la cultura del manejo del agua en el país, será difícil que haga conciencia y uso racional de la misma.

El agua que se necesita para beber, cocinar y una higiene básica son 30 a 40 litros por persona al día, como mínimo vital en el ámbito de los derechos humanos, esta dotación debería ser gratuita, al menos para la población catalogada en el ámbito de pobreza multifuncional. En los siguientes tramos de consumo, la tarifa debe crecer, de forma que se induzca un consumo responsable y se penalicen los usos suntuarios o abusivos. Se trata, en suma, de garantizar el acceso universal a servicios de calidad para todos, al tiempo que se inducen enseñanzas e incentivos para un uso razonable a través de la política tarifaria (Cortez, P. et al., 2017).

Las tarifas que cobran los organismos operadores por el saneamiento, generalmente, cuando ello sucede, se incluyen dentro de la cuota de agua potable o incorporando un porcentaje sobre el consumo de agua potable que puede ir entre un 3 y un 40 por ciento. Por ello, resulta necesaria la definición de tarifas asociadas exclusivamente al tratamiento de aguas residuales, que reflejen el costo real de la prestación del servicio y permitan cubrir los costos de operación y mantenimiento de la infraestructura, a fin de proveer servicios de calidad y de forma sostenida. Los precios y tarifas deben ser fijados en forma ajena a un ambiente de politización y oportunismo de corto plazo que con frecuencia existe por parte de autoridades y congresos locales. Por ejemplo, un factor que perjudica la correcta operación de los organismos operadores tiene lugar cuando éstos se ven imposibilitados a elevar sus tarifas, ya que quienes los dirigen aspiran a otro cargo público y un alza en el precio del servicio es una medida poco popular.

Los ingresos por concepto de este rubro, por ley deben ser reinvertidos en el tratamiento del agua y no en otra cosa.

2 . 3 . 5 /**USO DEL AGUA TRATADA**

Las plantas de tratamiento no deben estar orientadas solamente al cumplimiento de las normas de descarga, deben empezar a considerar un uso más amplio de agua tratada como objeto primordial de las mismas, de forma que el agua tratada libere la demanda de agua potable utilizada en actividades que pueden ser llevadas a cabo con agua tratada. En cada población se debe promover el reúso agrícola si es el caso, habitacional e industrial.

En algunos casos se ha observado que el efluente adecuadamente tratado y con suficiente calidad para ser usado se debe retornar al drenaje pues se carece de una infraestructura y logística adecuada para el uso del agua tratada. Es necesario considerar su almacenamiento, transporte, sistemas de uso, así como todo el recurso humano capacitado asociado con ello, que difícilmente se puede encontrar en un porcentaje alto en el país.

Es difícil que la definición de políticas públicas en cuanto al reúso de agua surjan por generación espontánea en la sociedad; el estado, como ente responsable de proponerlas y ejecutarlas, debe orientar los esfuerzos en ese sentido y delinear la política pública a seguir a través de normas, leyes, incentivos, apoyo económico y con un programa transexenal de permeado y siembra de conocimiento en la sociedad en ese sentido, todo ello bajo la vigilancia de un ente asesor-supervisor, posiblemente de carácter estatal o federal.

Para el caso de la Península de Yucatán, el manejo adecuado del agua en las cuencas debe estar enfocado en su reutilización; ello, como ya se indicó, libera agua para primer uso, pero además, evita la descarga de aguas residuales crudas o mal tratadas al subsuelo, que por las características cársticas del mismo, su infiltración es inmediata sin mediar mayor tratamiento por parte del suelo.

2 . 3 . 6 /

SOBRE LOS PROGRAMAS DE APOYO FEDERAL

El actual Programa de Agua Potable, Drenaje y Tratamiento (Proagua) es resultado de la fusión de los Programas presupuestarios S047.- Programa de Agua Limpia; S075.- Programa para la Construcción y Rehabilitación de Sistemas de Agua Potable y Saneamiento en Zonas Rurales, S218.- Programa de Tratamiento de Aguas Residuales y S074.- Programa de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento en Zonas Urbanas. Para su operación, el Proagua se integra con los apartados Urbano (Apaur), Rural (Aparural), Agua Limpia (AAL), Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y Proyecto para el Desarrollo Integral de Organismos Operadores de Agua y Saneamiento.

El PROAGUA le permite al Gobierno Federal brindar apoyo económico y técnico a los gobiernos estatal y municipal, quienes también aportan su contraparte de las inversiones, con el propósito de construir más plantas de tratamiento de aguas residuales, cuya operación, en lo general, queda bajo la administración de los gobiernos municipales.

Página web

(https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/634940/Edici_n_2020.pdf)

Por otra parte, estos programas federales privilegian y premian el hecho de dar tratamiento al agua residual para cumplir con cierta calidad de agua tratada más no están orientados, en lo fundamental, a premiar/incentivar el uso del agua tratada. Es claro que este enfoque plantea retos importantes en cuanto a la creación y mantenimiento de infraestructura para el reúso del agua; ya no es solamente la PTAR sino también el sistema de almacenamiento de agua tratada, su transporte, el sistema propiamente para un reúso dado y toda la logística humana necesaria para que ello funcione.

Otro punto importante relacionado con los programas es su instrumentación efectiva. Algunos municipios pueden no contar con el personal suficientemente capacitado para gestionar en tiempo y forma, alguno de estos programas de apoyo. Para ello, se hace necesario un programa de capacitación-orientación-divulgación efectivo y hasta de apoyo directo para la gestión por parte del gobierno Federal o Estatal u organismo de cuenca para facilitar la asimilación de dichos programas en la región.

Muchos de estos programas, para que operen y que el organismo operador o municipio sean beneficiados con el apoyo federal, solicitan la entrega de un estudio que sustente técnica, económica y socialmente el proyecto a efectuar. Este documento de sustento requiere necesariamente de amplio conocimiento técnico, no solamente relacionado con el tratamiento de aguas residuales, sino también financiero y de impacto ambiental y social que para el caso de municipios que no cuenten con personal capacitado para desarrollar esta actividad o recursos para subcontratarlo se constituye en un obstáculo infranqueable. Estos municipios deben ser apoyados con efectividad en su gestión.

2 . 3 . 7 /

SOBRE LA PARTICIPACIÓN DEL CAPITAL PRIVADO

Uno de los más sobresalientes dilemas es la gestión gubernamental directa o la participación de empresas privadas en los sistemas de agua municipales o metropolitanos, a través de concesiones o contratos de servicios. Aquí, un principio central para resolverlo es evitar que se impongan ideologías. Pueden funcionar eficientemente soluciones tanto públicas como privadas, siempre y cuando cumplan con principios básicos comunes de regulación y eficiencia, así como condiciones institucionales, financieras, administrativas y de operación. Existen buenos ejemplos de ello en México, tanto públicos (León, Monterrey, Mexicali, y Tijuana), como privados (Cancún, Aguascalientes, y Saltillo).

Desde luego, en el caso de soluciones con participación privada son imprescindibles licitaciones transparentes; contratos claros, equilibrados y flexibles; controles eficaces para evitar abusos; certidumbre jurídica, y una regulación eficiente y sostenible a largo plazo por parte de organismos o entes reguladores independientes creados ex profeso para ello, e integrados tanto por gobiernos como por organizaciones de usuarios (Janson, N. 2009).

En el campo del tratamiento de las aguas residuales se ha detectado la necesidad de invertir

en la rehabilitación de plantas de tratamiento, algunas por carecer de mantenimiento óptimo, estén mal diseñadas, abandonadas, otras porque cumplieron su vida útil y, la oferta de aguas residuales se ha incrementado a tal punto que las instalaciones son insuficientes. En este aspecto, es importante considerar la inversión pública, privada o mixta.

Sin embargo, para seguir incorporando al sector privado en la inversión en infraestructura de saneamiento y garantizar la operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento financiadas con recursos gubernamentales, haría falta fortalecer la situación financiera de los operadores, más aún cuando se trata de zonas o regiones del país en pobreza o marginación en donde el interés del sector privado para invertir estará vulnerado por la baja capacidad de pago de la población servida. Es decir, la participación de la iniciativa privada no es capaz de resolver por sí sola la problemática del tratamiento de las aguas residuales en el país; el Estado Mexicano debe intervenir decididamente en ello y considerar la intervención de la iniciativa privada solo como un aliado en ciertas condiciones.

2 . 3 . 8 /

CREACIÓN DE UN ENTE TÉCNICO QUE FORTALEZCA LOS SISTEMAS PARA EL MANEJO DEL AGUA EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Las causas de la falta de atención en parte de la infraestructura para el tratamiento de las aguas residuales son múltiples y muchas de ellas ocasionadas por la actual crisis política, económica, social y delincriminal en la que están sumergidos varios estados y municipios del país; aunado a ello está el factor más importante que es la pobreza y marginación en la que vive la mayor parte de la población del país y en particular varias regiones de la Península de Yucatán.

Los organismos operadores y municipios se enfrentan a una escasez crónica de recursos financieros y a una limitada capacidad de endeudamiento; operan una infraestructura en malas condiciones lo que implica una baja eficiencia operativa; muestran una amplia rotación en sus puestos directivos y personal en general, fenómeno que se traduce en pérdida de experiencia y nulo desarrollo de instituciones, aplican tarifas que no reflejan los costos de operación, mantenimiento y administración del sistema (Salazar, A., et al., 2015).

Bajo estas circunstancias, enfrentar los grandes retos que en materia de manejo integral del agua se plantean y pretender que ello lo procesen debidamente los municipios y estados,

se perfila como un reto a muy largo plazo, siendo que los problemas en materia de agua en general requieren de soluciones inmediatas por lo estratégico que es el tema para las condiciones productivas, de salud, sociales y económicas de la región. Bajo este ambiente, la descentralización democrática en cuanto al manejo del agua se torna utópica; para resolver los problemas que aquejan al sector, por lo menos en lo inmediato, en muchos casos se considera necesaria la centralización y concentración de la administración del tema agua en general y en lo particular, a lo que se refiere al tratamiento de las aguas residuales y su disposición final.

Se propone la creación de un ENTE estatal o regional público que ofrezca apoyo técnico a los municipios, organismos operadores e iniciativa privada en cuanto a la selección de tecnología, dar opinión técnica en los temas de su alcance, como diseño y operación de sistemas de tratamiento de agua residuales y saneamiento en general. Su apoyo podría ampliarse inclusive para ofrecer servicios de operación de plantas sin que ello sustituya la fiscalización del cumplimiento de las especificaciones de descarga que es

competencia de los organismos federales en esa materia. Este ENTE técnico regional, para el caso de que opere plantas de tratamiento, se haría responsable, representando al o los municipios, ante la autoridad competente en cuanto a la calidad del agua generada y en cuanto al cumplimiento de la normatividad vigente.

Entre las acciones derivadas de la creación de un ENTE técnico regional que abarque a la Península de Yucatán destacaría el establecer un inventario pormenorizado del estado funcional de las PTAR en la región o cuenca, la definición conceptual de proyectos integrales para el manejo de la cuenca y sub-cuenca con fines de reúso, un programa de capacitación para la operación y mantenimiento de PTARs y un plan regional de desarrollo de tecnología adecuada a la región con el concurso de universidades e instituciones regionales de desarrollo científico y tecnológico y de recursos humanos altamente capacitados en materia de tratamiento de aguas residuales.

Este ENTE técnico tendría, entre otras posibles, las siguientes atribuciones:

| *Ser un instrumento responsable de promover y garantizar técnicamente el cumplimiento de las normas vigentes, con objeto de mejorar la prestación de los servicios y proteger los intereses de todos los actores involucrados.*

| *Propiciar una mayor eficiencia, claridad y transparencia de las operaciones del sistema de agua y en lo particular a lo que concierne al tratamiento de las aguas residuales.*

| *Tener a su cargo la supervisión y apoyo técnico de los organismos operadores municipales en materia de tratamiento de aguas residuales, constituidos por las posibles empresas paramunicipales, tripartitas o mixtas que se constituyan, o bien por concesionarios encargados de la prestación de los servicios, incluyendo a los comités, consejos o juntas de agua, con el único fin de propiciar la mejora de sus eficiencias comerciales y operativas.*

| *Recomendar las tecnologías a aplicar en materia de tratamiento de aguas residuales adaptadas a las condiciones de la región.*

| *Constituirse en el reservorio de la información relativa al proceso de licitación, diseño del proceso de tratamiento y las bitácoras operativas de las PTAR en la región.*

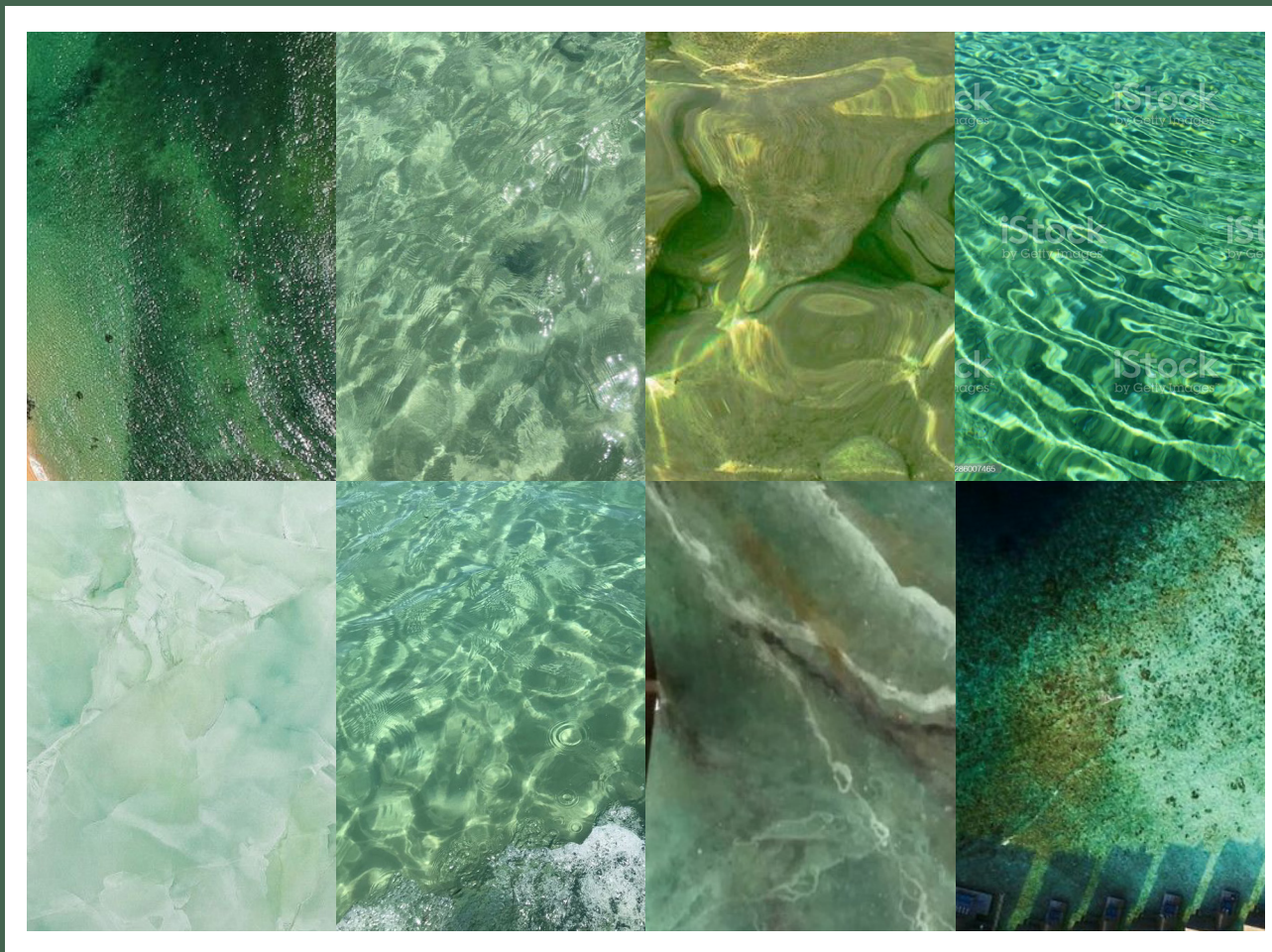
| *Tener a su cargo mediante contrato con los municipios interesados, la operación y mantenimiento de sus PTAR. Esto último implicaría un costo que deberá ser cubierto con recursos presupuestales municipales, complementados por programas federales que incentiven la aplicación de planes de mejora y cumplimiento de las instalaciones de tratamiento.*

| *Ofrecer asesoría técnica especializada para coadyuvar a resolver posibles conflictos de carácter técnico que pudieran surgir frente a un operador que tiene mucha más información y recursos que el ciudadano común.*

| *Promover la profesionalización de la estructura institucional de los sistemas municipales de agua potable, alcantarillado y saneamiento y con ello evitar criterios políticos y de coyuntura en el nombramiento de cuadros técnicos y directivos.*

| *Desarrollar un sistema permanente de capacitación y certificación del personal operativo de las plantas de tratamiento de aguas residuales.*

Criterios y **RECOMENDACIONES** **SOBRE LAS** **TECNOLOGÍAS** **Y PROCESOS DE** **TRATAMIENTO DE** *aguas residuales*



CARACTERÍSTICAS DE LA TECNOLOGÍA

sustentable

Las tecnologías sustentables para el tratamiento de aguas residuales son aquellas que emplean la menor cantidad de energía posible para realizar con eficacia y eficiencia los procesos para los cuales fueron diseñadas, empleando, además, la menor cantidad de insumos químicos y materiales en general para su construcción, puesta en marcha, estabilización y operación continua. Una característica inherente de estas tecnologías es que no deberán impactar negativamente el medio ambiente natural y social, por el contrario, potenciarán su desarrollo mediante la producción de agua tratada y la generación de subproductos reutilizables bajo el esquema de una economía circular (energía, nutrientes).

ABANICO DE TECNOLOGÍAS EXISTENTES PARA SISTEMAS BIOLÓGICOS Y SISTEMAS NATURALES

construidos

El propósito principal del tratamiento del agua residual es remover el material contaminante, orgánico e inorgánico, el cual puede estar en forma de partículas en suspensión y/o disueltas, con objeto de alcanzar una calidad de agua requerida por la normativa de descarga o por el tipo de reutilización a la que se destinará.

La secuencia general completa de un tren clásico de tratamiento de aguas residuales incorpora un tratamiento preliminar para la eliminación por retención de sólidos gruesos, un tratamiento primario para la remoción de sólidos suspendidos por sedimentación o flotación, seguido de un tratamiento secundario enfocado a la remoción de materia orgánica disuelta y coloidal y finalmente un tratamiento terciario que involucra la eliminación de nutrientes y la desinfección entre otros contaminantes remanentes de los tratamientos anteriores.

El abanico de opciones tecnológicas para el tratamiento de las aguas residuales lo concentra el tratamiento secundario.

En la Figura 3.1 se esquematiza el abanico de posibilidades tecnológicas. En esta figura se resalta la división en dos grandes grupos, los tratamientos físico-químicos y los biológicos. Los primeros hacen uso, como su nombre lo indica, de procesos físicos (uso de la gravedad, filtración por retención física, atracción electrostática, etc.) y de procesos químicos (coagulación, absorción, oxidación, precipitación, etc.). El segundo tipo involucra la degradación o transformación del material orgánico por medio de microorganismos. Dentro de los sistemas biológicos existen los sistemas aerobios (requieren oxígeno molecular disuelto) y los anaerobios (funcionan sin oxígeno).

Tecnologías para el
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL



FIGURA 3.1 CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (NOYOLA, A. ET AL., 2013)

Los sistemas naturales contruidos, aprovechan las transformaciones que se llevan a cabo en el medio natural, solamente que en estas unidades se busca incrementar su capacidad de tratamiento en unidades de proceso controladas. Tal es el caso de los humedales artificiales, sistemas lagunares o el tratamiento mediante descargas directas a suelo.

Por otro lado, los sistemas anaerobios se pueden clasificar en tres generaciones que a su vez se integran según sea el nivel de interacción que posee el microorganismo con el sustrato a degradar (facilidad de transferencia de masa) y la relación entre el tiempo de retención del microorganismo en el sistema (denominado tiempo de retención celular, TRC) y el tiempo de retención hidráulica del sistema (TRH). Más adelante se abundará en esta clasificación.

Es necesario hacer notar que la oferta tecnológica en el mercado es amplia y se presenta bajo distintos nombres o denominaciones que en ocasiones tiene el carácter de marcas registradas.

Sin embargo, invariablemente, sabiendo analizar cualquier tipo de sistema de tratamiento presentado bajo una marca registrada o nombre comercial, se podrá clasificar en algún tipo de proceso de tratamiento, o combinación de ellos, presentados en la Figura 3.1.

En un sistema de tratamiento de aguas residuales, la ley de la conservación de la materia hace que al retirar de alguna forma el material contaminante del agua residual, éste solo se transforme o transfiera. Por esta simple razón, siempre se producirán residuos, tales como los lodos, en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, acompañados por la generación de emisiones gaseosas. Se resalta que es inevitable la producción de lodos en las plantas de tratamiento, por lo cual se debe considerar su tratamiento para su adecuada disposición.

Para la remoción de la materia orgánica biodegradable existen dos tipos de tratamiento, el anaerobio y el aerobio, que se comentan a continuación:

3 . 2 . 1 /

SISTEMAS AEROBIOS

En los sistemas de tratamiento aerobios se identifican básicamente cinco procesos, es decir, los lodos activados, el sistema de lagunas de estabilización (lagunas facultativas y de oxidación), el filtro percolador, el filtro sumergido y el disco biológico rotatorio. Los demás sistemas aerobios existentes son variantes, combinaciones o mejoras secundarias de estos procesos básicos identificados por una constelación de marcas y productos comerciales (Noyola, A. et al., 2013).

Las lagunas son sistemas que prácticamente no requiere equipo electromecánico, tiene los requerimientos más bajos de personal, es capaz de producir agua apta para riego y elimina coliformes cuando incluyen lagunas de pulimento al final del sistema. Sin embargo, es deseable considerar el requerimiento de terreno y los altos costos demandados después de un cierto número de años cuando el sistema requiere el retiro de los lodos acumulados.

Todos los demás sistemas biológicos aerobios como son los lodos activados, filtro sumergido, filtro percolador y discos biológicos rotatorios pueden ser aplicados en el tratamiento del agua residual doméstica o municipal. En este caso, la elección de un sistema de tratamiento estará supeditada básicamente al costo de operación y mantenimiento, así como a criterios



FIGURA 3.2 SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS (FUENTE: IBTECH)

que minimicen el impacto ambiental de las plantas de tratamiento de aguas residuales. En un agua residual con alta concentración de materia orgánica, en la cual se requiera aplicar un tratamiento que produzca un agua residual para reúso, es conveniente desde el punto de vista económico la combinación de procesos anaerobios como primer tratamiento, seguido de los procesos aerobios ya señalados.

La disponibilidad de área es el criterio que limita el empleo de lagunas de estabilización ya que requieren, en comparación con los otros sistemas un área de alrededor 70 veces mayor. En centros urbanos, los altos costos del terreno son el factor restrictivo en la selección de este sistema además de que, para el caso de lagunas anaerobias, es necesario considerar cubrirlas para captar los gases que se desprenden propios de la degradación de la materia orgánica y que son gases de efecto invernadero, así como de malos olores. Una laguna anaerobia no cubierta es simplemente un centro de transferencia de contaminación del agua a la atmósfera y no un sistema que abone íntegramente a la protección ambiental. Las lagunas deben, necesariamente, captar los gases emitidos.

Derivado del metabolismo propio de los sistemas aerobios son los que más lodo biológico producen como consecuencia de la transformación de la materia orgánica en un nuevo microorganismo (del 60 a 65% de la materia orgánica que ingresa a la planta).

3 . 2 . 2 /

SISTEMAS ANAEROBIOS

La característica fundamental que poseen los sistemas anaerobios es que su operación no depende del suministro de oxígeno y por lo tanto no se requieren equipos de aireación y todo lo relacionado con su mantenimiento, operación y costo energético. Es por ello, que la consideración del uso de sistemas anaerobios dentro de un tren de tratamiento de aguas residuales, y en específico, en el ámbito municipal, es altamente recomendable cuando la temperatura del agua lo permita (superior a los 20°C).

Dentro de la gama de posibilidades en los reactores anaerobios, resalta el reactor anaerobio de lecho de lodos con flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés aceptado genéricamente en el mundo) como la opción más favorable técnica y económica a aplicar. La inserción de este reactor en el tren de tratamiento le confiere capacidad de absorber picos orgánicos (muy frecuentes en el país por descargas clandestinas de industrias de todo tipo en el drenaje municipal) y disminuye los requerimientos energéticos de los tratamientos subsecuentes, además de que repercute favorablemente en la disminución de la producción de lodos residuales y, dependiendo del tamaño de la planta de tratamiento, inclusive en la producción de energía a través de la combustión del metano en el biogás. Este tipo de reactor anaerobio, si bien es plenamente aceptado en sus aplicaciones para aguas residuales industriales, se utiliza ya para el tratamiento de aguas residuales de tipo municipal en muchos países.



FIGURA 3.3 SISTEMA ANAEROBIO PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES CON QUEMADO DE BIOGÁS (FUENTE: II-UNAM)

3 . 2 . 3 /

ROCESOS ACOPLADOS ANAEROBIOS-AEROBIOS

En resumen, los sistemas anaerobios poseen las siguientes ventajas sobre los aerobios:

- | *No usan energía eléctrica para operar*
- | *Pueden producir energía térmica y/o eléctrica a través de la combustión del biogás (metano)*
- | *Producen aproximadamente 5 veces menos lodo biológico (menor requerimientos para su tratamiento y disposición) que un proceso convencional de lodos activados.*

Las ventajas de los sistemas aerobios sobre los anaerobios son:

- | *La calidad de agua tratada es muy superior*
- | *Son más rápidos en su arranque*

Derivado de lo anterior, la combinación de ambos sistemas aprovecha las ventajas de cada uno de ellos.

Los procesos acoplados anaerobio-aerobio aumentan la eficiencia energética en el tratamiento de las aguas residuales comparado con una planta solamente aerobia. En la etapa anaerobia se elimina la mayor cantidad de materia orgánica en el agua residual y en la aerobia se pule el efluente anaerobio. La calidad del agua es recomendada para su reutilización en riego, lavado de coches y calles e inclusive en la descarga de sanitarios, con una adecuada filtración y desinfección, esta última para todos los casos. Una de las ventajas más importantes que ofrece este tipo de acoplamiento, además del decremento del costo de operación y mantenimiento, es la disminución en hasta 5 veces de la producción de lodo, al ser comparada con la de un sistema aerobio convencional. Además, el lodo producido puede considerarse parcialmente estabilizado.

REMOCIÓN DE *nutrientes*

Para la remoción de nutrientes es posible aplicar procesos físico-químicos, pero sus elevados costos y generación de lodo no fácilmente tratable, los hacen en muchos casos no recomendables.

La utilización de sistemas biológicos para este objeto es lo más adecuado. Existen sistemas de tratamiento con biomasa suspendida concebidos para la remoción simultánea de nitrógeno y fósforo. Estos sistemas utilizan procesos naturales existentes dentro del ciclo natural del nitrógeno como es la nitrificación (medio aerobio) y la desnitrificación (medio anóxico) combinado con el medio anaerobio. Los sistemas con biomasa fija únicamente remueven nitrógeno. En este último caso, si se requiere la eliminación de fósforo, puede ser conveniente acoplar un proceso químico.

Las plantas de tratamiento que tiene en su sistema la capacidad de remoción de nutrientes tienden a ser plantas más complejas y grandes que las que están orientadas solamente a la remoción de materia orgánica. Son plantas de tipo terciario con mayor demanda de energía e insumos, así como mayor especialización del personal para su operación.

Por otra parte, es posible el uso de sistemas extensivos como las lagunas (Rolim, S., 2000) y los humedales artificiales para la eliminación de nutrientes, aunque ello demanda una considerable área y admitir la presencia de algas en el efluente tratado.



FIGURA 3.4 HUMEDAL ARTIFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES (FUENTE: II-UNAM)

TRATAMIENTO Y MANEJO *de lodos*

La generación de lodo o biomasa en el tratamiento del agua es inevitable y es un factor muy importante, por los costos de operación que implica su manejo, que debe ser considerado para una buena elección del proceso de tratamiento. En algunos casos, el tratamiento y disposición del lodo generado por una planta de tratamiento llega a requerir un elevado porcentaje de los costos de inversión y operación de la planta, pudiendo alcanzar el 50 por ciento de la inversión total. Por lo anterior, como ya se comentó, es favorable la inserción de los sistemas anaerobios en los trenes de tratamiento en conjunto con el pulimento aerobio.

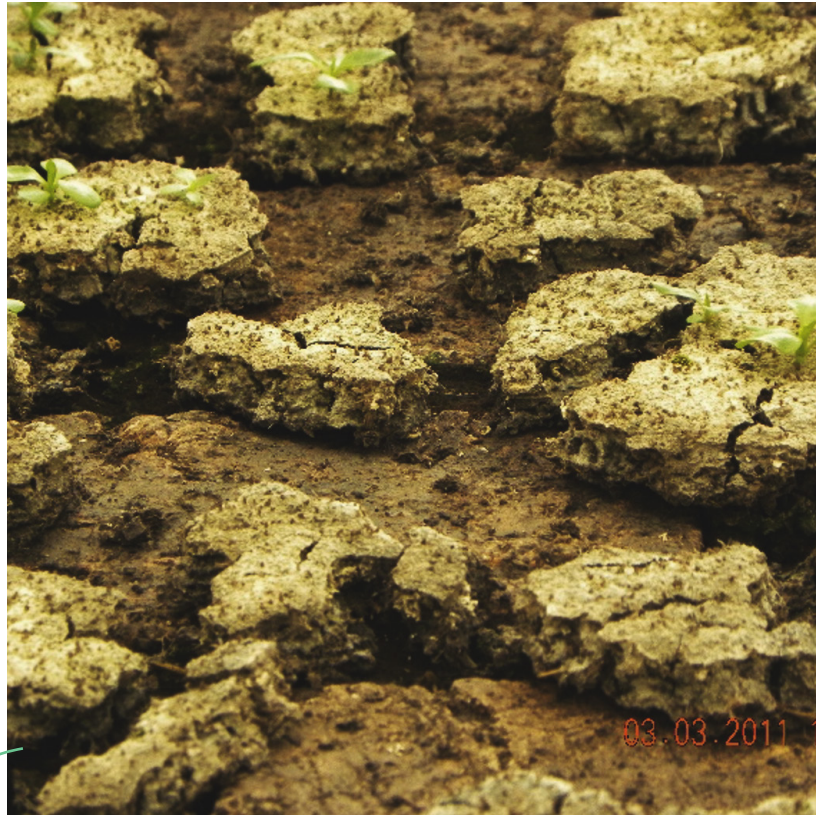


FIGURA 3.5 LODO DE PURGA SECO EN UN LECHO DE SECADO (FUENTE:II-UNAM)

TRATAMIENTO Y MANEJO DE EMISIONES

gaseosas

Las plantas de tratamiento son sistemas para descontaminar, y por lo tanto, benéficas al medio ambiente. Sin embargo, si no son adecuadamente conceptualizadas, diseñadas, mantenidas y operadas pueden convertirse en elementos con alto impacto ambiental (Morgan-Sagastume, J.M., et al., 2001).

Los puntos en una planta de tratamiento relacionados con los impactos ambientales se refieren a la generación y disposición de lodos, a la descarga y/o uso de aguas tratadas no con la calidad adecuada, al ruido provocado por la operación equipo y a la emisión de gases a la atmósfera. Este último factor puede ser particularmente relevante ya que es detectado de inmediato por la población circundante a través de la generación de malos olores. Las emisiones gaseosas de los sistemas de tratamiento también pueden contribuir al cambio climático mediante la liberación de gases de efecto invernadero (GEI), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) si es que no se controlan adecuadamente.

La fracción de CO_2 que se cuantifica como emisión de gas de efecto invernadero es la proveniente de la quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica

que sostiene la operación de los equipos de la planta de tratamiento (bombas, sopladores). El metano y el H₂S (principal promotor de los malos olores) se genera en las plantas de tratamiento de aguas residuales debido a la descomposición anaerobia de la materia orgánica que se lleva a cabo desde los drenajes, en los sistemas de bombeo, tratamiento preliminar y fundamentalmente en los sistemas de tratamiento anaerobio cuando se integran a un sistema de tratamiento (reactores, lagunas y digestores de lodo). La captación de este gas y su manejo y disposición adecuada es imprescindible para evitar su emisión a la atmósfera. Las tecnologías disponibles para el control de malos olores pueden consultarse en Noyola A., et al, (2006) y Revah, S., Morgan-Sagatume, J.M. (2005).

Una planta de tratamiento aerobia mal diseñada u operada también puede generar metano, al crear zonas anaerobias en el tanque de aeración o en los lodos retenidos en los sedimentadores. Es imprescindible el quemado del metano generado en los sistemas anaerobios, aun cuando no se aproveche energéticamente.

OFERTA TECNOLÓGICA EN EL MERCADO ES EN REALIDAD

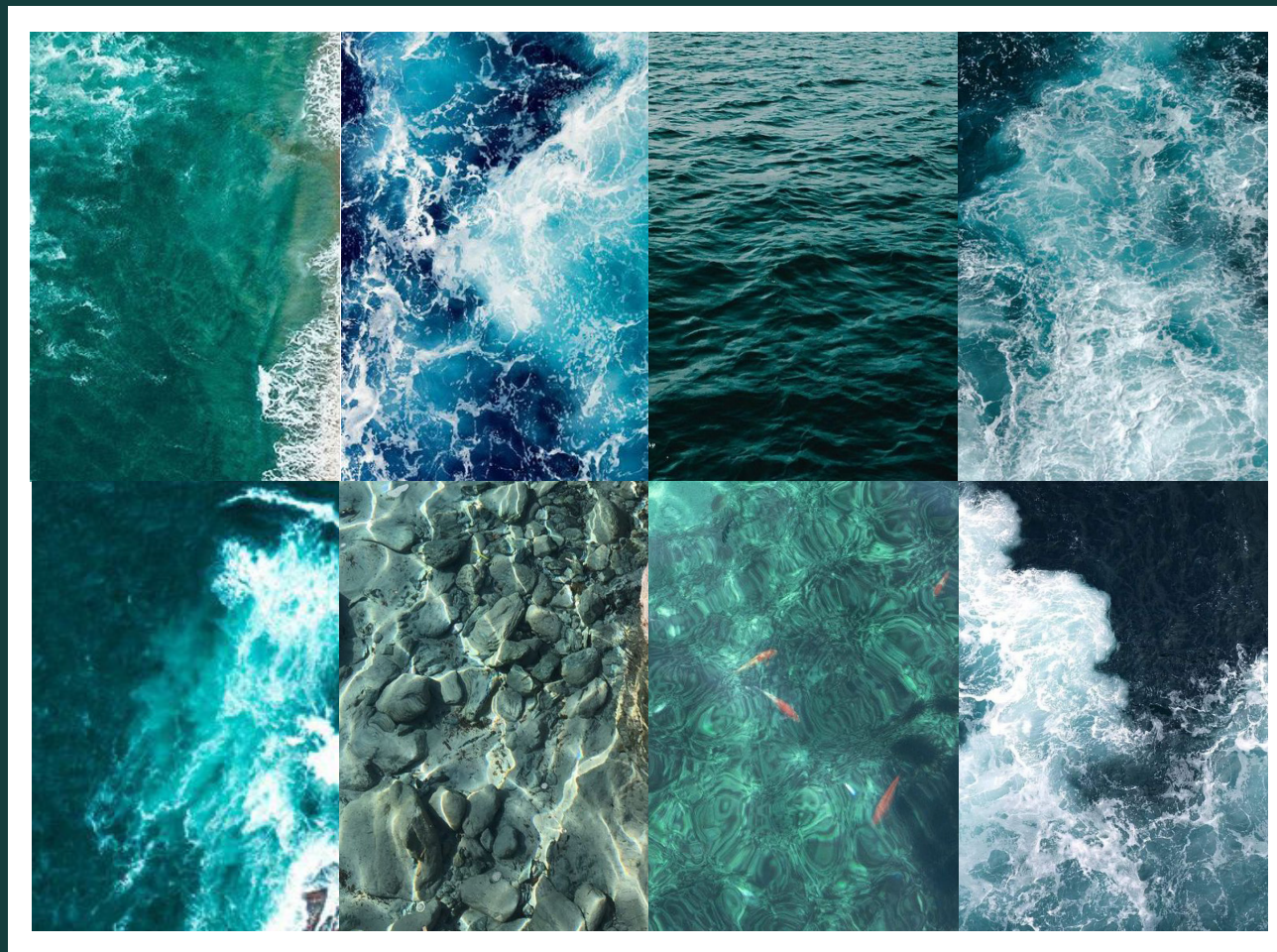
limitada

El número de tecnologías existentes es finita y se desarrollan avances con relativa lentitud; aparentemente la diversidad de oferta tecnológica en el campo del tratamiento del agua residual pareciera ser muy amplia, sin embargo no es así en realidad.

En función de las condiciones del proyecto de que se trate y si se restringe al tratamiento de aguas residuales de origen municipal, se observa que el uso más frecuente de tecnologías y su integración en trenes de tratamiento se reduce a menos de ocho.

Desafortunadamente existen en el mercado ofertas que pueden calificarse como fraudulentas, ya que ofrecen niveles de tratamiento imposibles técnica y económicamente, siendo la detección de ello uno de los principales retos que tiene el responsable de la toma de decisiones. En este sentido, por ejemplo, ciertos proveedores de plantas ofrecen que los sistemas que comercializan no producen lodos. Si fuera así, ello viola la primera ley de la termodinámica que versa sobre la conservación de la masa y la energía. La materia orgánica contenida en el agua residual se transforma irremediamente por medio de una planta de tratamiento biológica en energía, emisiones a la atmósfera y lodos.

Situación del
**MANEJO Y
TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES
EN LA PENÍNSULA DE**
Yucatán



SITUACIÓN HIDROFISIOGRÁFICA EN LA PENÍNSULA *de Yucatán*

Políticamente, la Península de Yucatán está constituida por los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo. Sin embargo, los estudios geofísicos indican que forma una gran cuenca junto con Belice y el Petén en Guatemala.

La región está descrita como una superficie plana y de baja altitud, donde el principal relieve es la Sierrita de Ticul, cuya extensión es de 110 km² y elevación de 3,000 metros sobre el nivel del mar. Esta elevación divide la topografía de la zona: al sur se presentan lomeríos con pequeños valles, hasta de 150 msnm; mientras que, en el norte se tiene una extensa planicie con pendiente mínima, con elevación máxima de 50 m (CONAGUA, 2015). La Península de Yucatán se encuentra ubicada en la Región Hidrológico Administrativa (RHA) XII "Península de Yucatán", la cual comprende la totalidad de los estados de Quintana Roo, Yucatán y Campeche y está administrada por el Organismo de Cuenca del mismo nombre. Además, la RHA XII está conformada por las siguientes Regiones Hidrológicas (RH): parte de la región hidrológica RH30 Grijalva-Usumacinta, RH31 Yucatán Oeste, RH32

Yucatán Norte y RH33 Yucatán Este. Se localiza en la porción sureste de la República Mexicana y colinda al norte y al poniente con el Golfo de México, al sur con la República de Guatemala, al Oriente con el Mar Caribe, al suroeste con el estado de Tabasco y al sureste con Belice, país con el que comparte la cuenca del río Hondo. Cuenta con una extensión territorial total de 139,897 km², que representa 7% de la superficie terrestre de la República Mexicana (INEGI, 2012 en CONAGUA, 2012). En la Figura 4.1 se muestra la ubicación de los estados, las Regiones Hidrológicas y las Regiones Hidrológicas Administrativas que componen la Península de Yucatán.

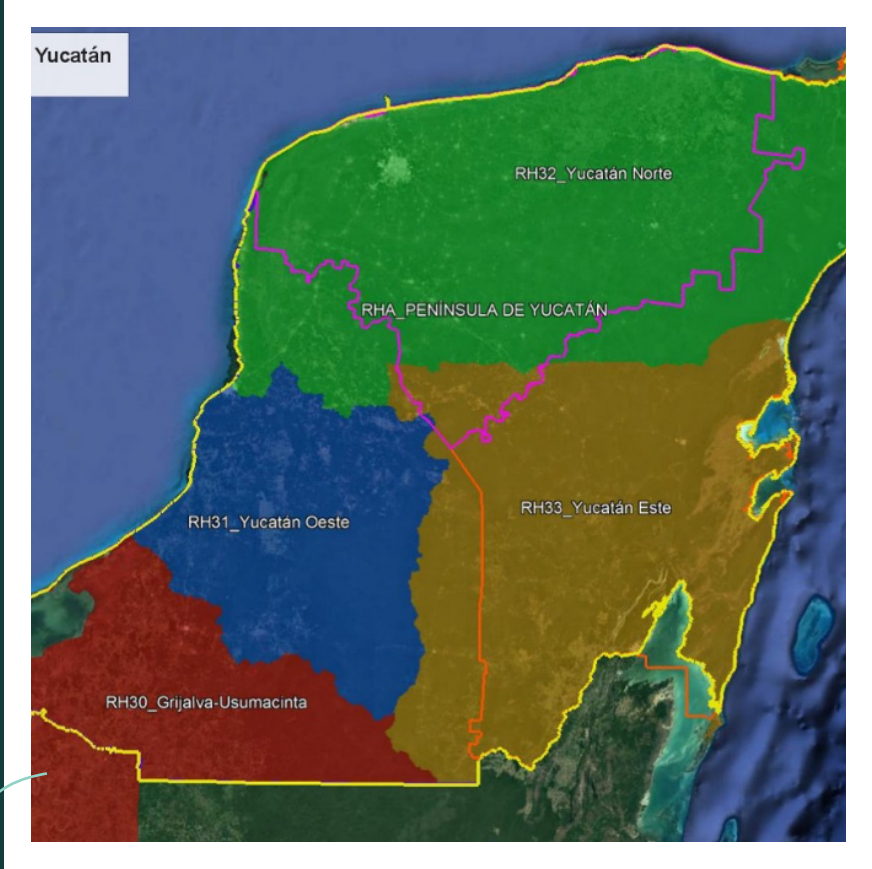


FIGURA 4.1 REGIONES HIDROLÓGICAS, HIDROLÓGICO ADMINISTRATIVAS Y ESTADOS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

La Península de Yucatán, con excepción de la parte sur y los litorales, se ve favorecida por una alta capacidad de renovación del agua subterránea debido a la gran capacidad de infiltración del terreno, así como a la alta precipitación pluvial y a la reducida pendiente topográfica.

La precipitación pluvial de la región va desde 125 mm en el extremo occidental hasta 800-1,200 mm en el resto de la península. Además, a lo largo del litoral se tiene una singular biodiversidad debido a los cerca de mil kilómetros lineales de manglar y humedales (Kauffer, 2011).

Existen pocos cuerpos de agua en la Península debido a que el agua, para volver al mar, se infiltra con gran facilidad y rapidez en el subsuelo formando cavidades y aguadas interiores, lo que ha dado lugar, por un lado, a una ausencia de depósitos de agua superficial -existen tan sólo 12 lagos en la zona-; y por el otro, esta peculiaridad se relaciona con la formación de un importante sistema de formas cársticas que incluye cenotes y sistemas de cuevas de proporciones considerables (Kauffer, 2011).

Debido a sus características de gran fracturamiento, abundancia de oquedades, su alta conductividad hidráulica y el escaso espesor de los suelos, el acuífero de la Península de Yucatán es muy vulnerable a la contaminación, debido a la rapidez con la que el contaminante accede al acuífero. Esta situación es especialmente importante debido al impacto de las actividades humanas de la zona (CONAGUA, 2015).

4 . 1 . 1 /

RÍOS Y LAGUNAS EN LA REGIÓN

El Río Candelaria es el principal escurrimiento de tipo perene y desemboca en la Laguna de Términos. En la Región RH30, se encuentran los ríos Palizada, Chumpán, Candelaria y Mamantel; en la Región R31, el río Champotón y, en la RH33, el arroyo Ucum o río Escondido y el río Hondo, el cual funge como límite internacional con Belice y se origina a partir de la confluencia del Arroyo Azul y el Río Bravo, con una longitud de 121 km y una cuenca de más de 13,000 km² (CONAGUA, 2012).

Por otro lado, con respecto a los sistemas lagunares, hacia el suroeste del estado de Campeche se encuentra el sistema lagunar más importante del litoral del Golfo de México, constituido por la Laguna de Términos y otras que la circundan como son: Pom-Atasta, Puerto Rico, Del Corte, el Vapor, San Francisco, del Este, Balchacah y Panlao. En el estado de Quintana Roo, destacan la Laguna de Bacalar con 50 km de longitud, Chinchancanab y el sistema Lagunar Nichupté con 12 km de longitud (CONAGUA, 2015).

SITUACIÓN DEL AGUA POTABLE EN *la región*

4 . 2 . 1 /

USOS DEL AGUA

En la península, prácticamente toda el agua que se utiliza proviene del acuífero, con un 94%. En el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) se registran los volúmenes concesionados (o asignados, en el caso de volúmenes destinados al uso público urbano o doméstico) a los usuarios de aguas nacionales, dicho registro clasifica los usos del agua en 12 rubros; sin embargo, para fines prácticos se clasifican en 5 grupos, cuatro de ellos corresponden a usos consuntivos: agrícola, abastecimiento público, industria autoabastecida y la generación de energía eléctrica (excluyendo hidroelectricidad), y por último, el hidroeléctrico que corresponde a un uso no consuntivo. El uso agrícola incluye los rubros agrícola, pecuario, acuacultura y usos múltiples; el uso para abastecimiento público incluye el uso público urbano y doméstico; el uso para industria autoabastecida incluye los rubros industrial, agroindustrial, servicios y comercio (SINA-CONAGUA).

De acuerdo con el REPDa, de 2005 a 2015 el volumen concesionado anual se incrementó en

un 134%, pasando de 1,786 hm³/año en 2005 a 4,184 hm³/año en 2015. Del volumen extraído en ese mismo año, el 41.5% está dedicado a actividades agrícolas, seguido de usos múltiples (29%) y por el público urbano (15%). Los usos múltiples incluyen los títulos empleados para más de un uso, generalmente representan actividades agrícolas y pecuarias, de manera que, la cantidad de agua destinada para las actividades agrícolas es mayor a la reportada en la categoría específica (CONAGUA, 2015). En la Tabla 4.1 se presentan los volúmenes concesionados por cada entidad que compone la región.

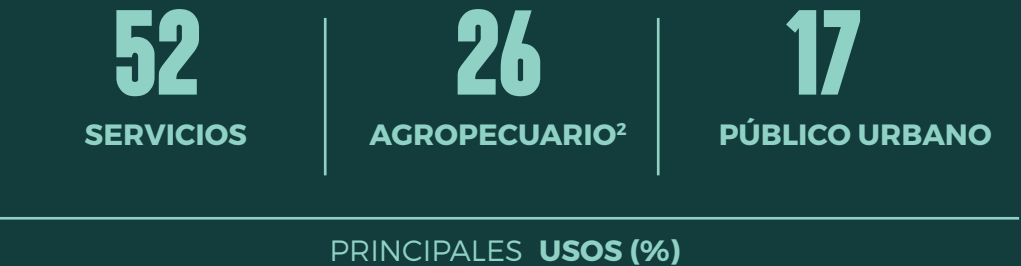
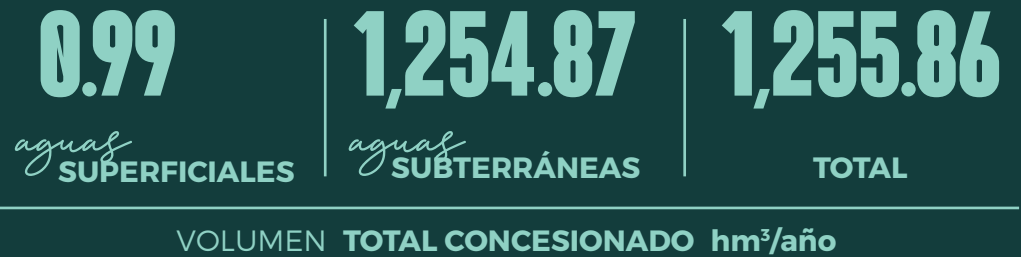
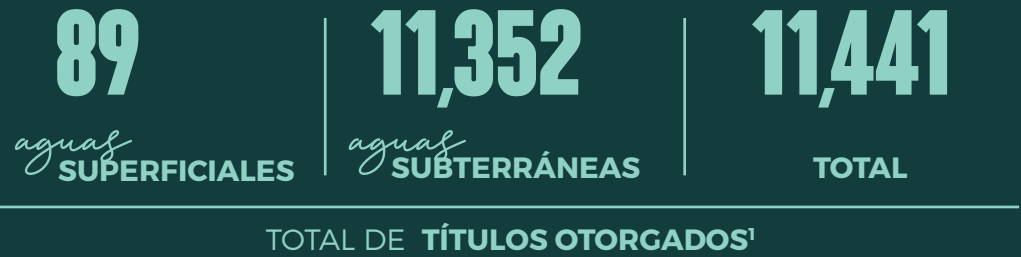
TABLA 4.1. VOLÚMENES CONCESIONADOS POR ENTIDAD ACTUALIZADO A 2021

C A M P E C H E

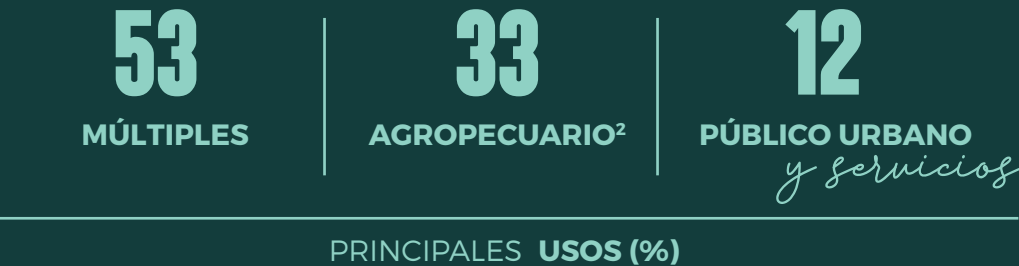
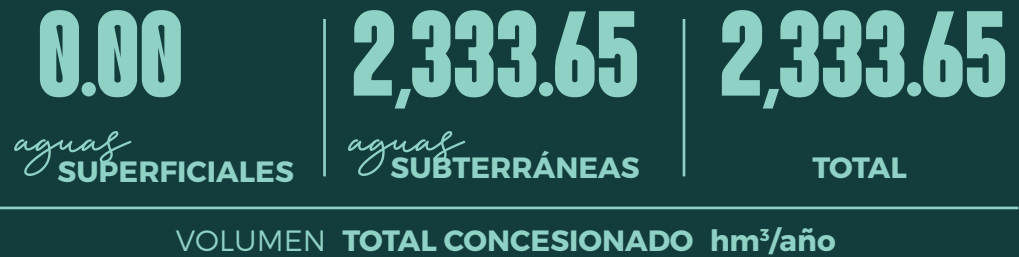
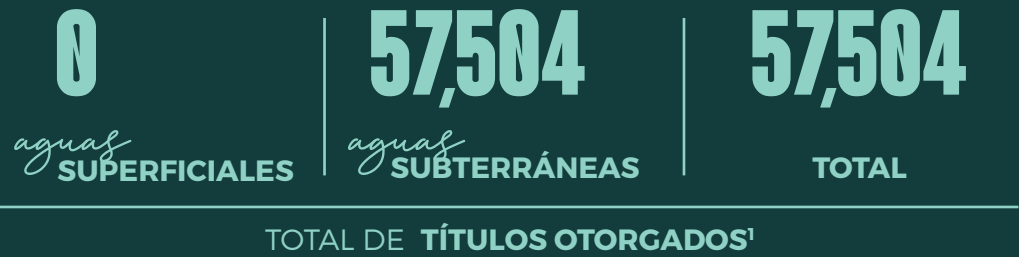


1. Incluyen títulos y anexos
 2. Incluyen usos agrícolas, agroindustriales, acuacultura y pecuarios
 Fuente: Adaptado del REPDA (2021)

Q U I N T A N A R O O



Y U C A T Á N



4 . 2 . 2 /

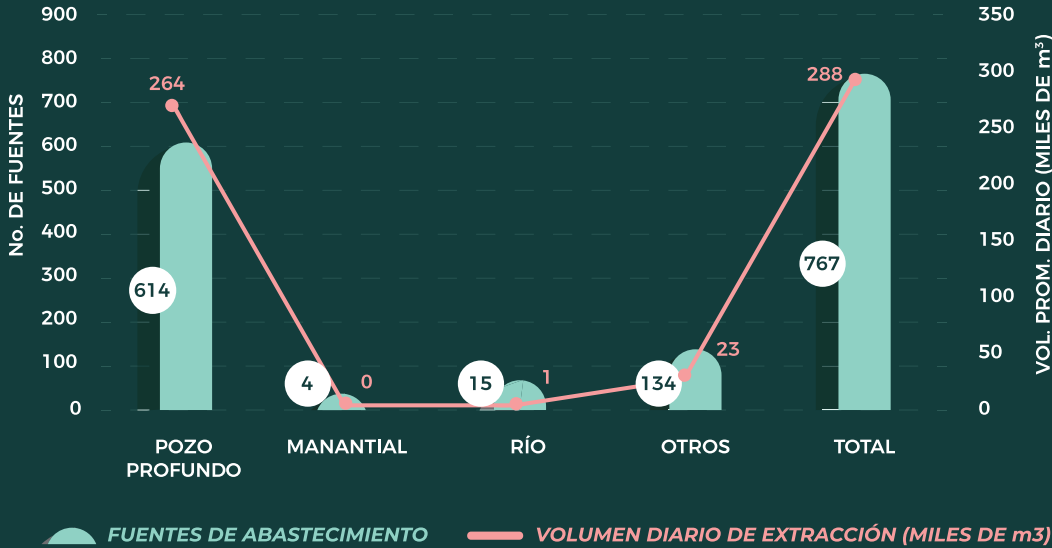
FUENTES DE ABASTECIMIENTO Y
VOLUMEN DE EXTRACCIÓN

Campeche

En la Figura 4.2 se muestran los tipos y cantidad de fuentes de abastecimiento, así como los volúmenes promedio diario de extracción de agua de primer uso en el estado para el año 2016.

FIGURA 4.2. FUENTES DE ABASTECIMIENTO Y VOLUMEN PROMEDIO DIARIO DE EXTRACCIÓN DE AGUA PARA POTABILIZAR EN CAMPECHE EN 2016
FUENTE: ADAPTADO DE INEGI,2017 (1)

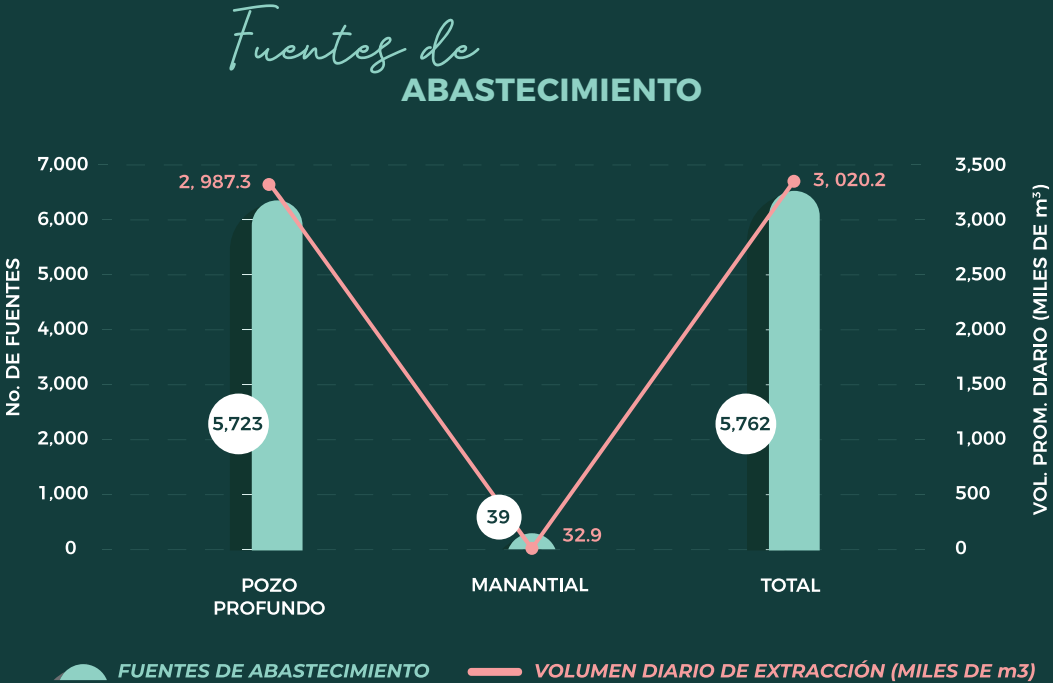
Fuentes de
ABASTECIMIENTO



Quintana Roo

En la Figura 4.3 se presentan las fuentes de abastecimiento de agua potable en tipo y cantidad; asimismo, se muestran los volúmenes promedio diario de extracción para el 2016 en Quintana Roo.

FIGURA 4.3. FUENTES DE ABASTECIMIENTO Y VOLUMEN PROMEDIO DIARIO DE EXTRACCIÓN DE AGUA POTABLE EN QUINTANA ROO EN 2016
FUENTE: ADAPTADO DE INEGI,2017 (2)

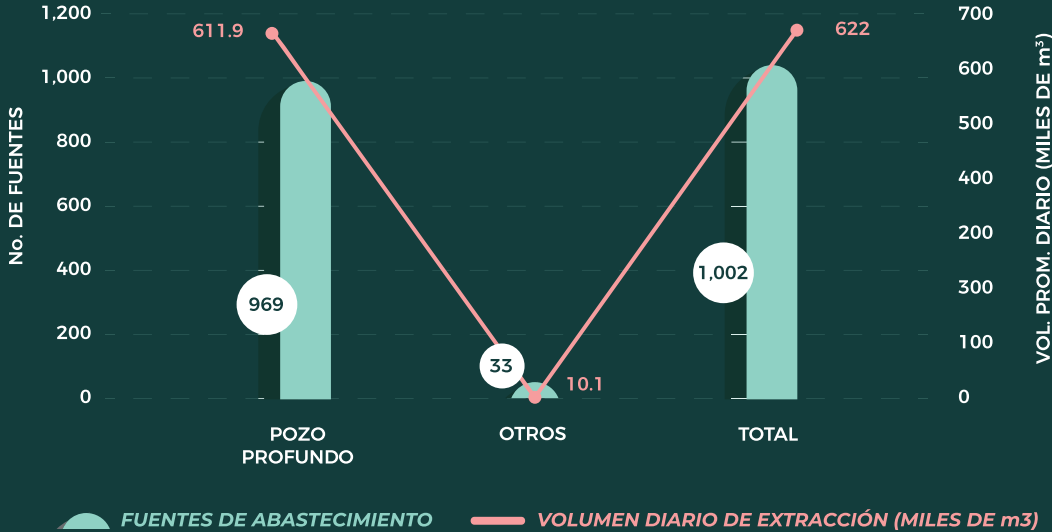


Yucatán

La Figura 4.4 expone los tipos y cantidad de fuentes de abastecimiento y los volúmenes promedio diario de extracción de agua potable del estado de Yucatán en 2016.

FIGURA 4.4 FUENTES DE ABASTECIMIENTO Y VOLUMEN PROMEDIO DIARIO DE EXTRACCIÓN DE AGUA POTABLE EN YUCATÁN EN 2016
FUENTE: ADAPTADO DE INEGI, 2017 (3)
OTROS. INCLUYE: POZO EXCAVADO, CENOTE, NORIA

Fuentes de
ABASTECIMIENTO



4 . 2 . 3 /

COBERTURA DE RED DE AGUA
POTABLE

Se hace notar que dentro de la metodología del INEGI (2019) para llevar a cabo el Censo Nacional de Población y Vivienda – quinquenalmente– así como para el levantamiento de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH-bianual) se toma en cuenta los siguientes aspectos en la variable de “disposición de agua”: 1. Agua entubada dentro de la vivienda, 2. Agua entubada fuera de la vivienda, pero dentro del terreno (a un radio de hasta 1 km de distancia o menor a 30 minutos de caminata), 3. Agua entubada de llave pública o hidratante, 4. Captadores de agua de lluvia, 5. Agua entubada que acarrean de otra vivienda, 6. Agua de pipa y por último, 7. Agua de un pozo, río, lago, arroyo u otra.

La CONAGUA contabiliza las dos primeras opciones, hogares con disposición de agua potable dentro de la vivienda y/o fuera de la vivienda pero dentro del terreno. En este sentido los datos ascienden para el 2015 en el estado de Campeche a 93.5% con 840,907 personas beneficiadas; mientras que, para Quintana Roo

las personas que gozan con el servicio de agua potable son 1,459,044 con un porcentaje de cobertura del 97.3%. Por su parte, Yucatán tiene la mayor cobertura de la región con 98.3% y 2,096,177 personas con el servicio. Sólo Campeche se encuentra debajo del promedio de cobertura nacional que es de 94.4% (CONAGUA, 2019).

No obstante, el contabilizar únicamente los hogares que cuentan con la infraestructura dentro de su hogar, lo cual es lo deseado y óptimo, las cifras descienden a 65% de cobertura para Campeche, y 74% para Yucatán y Quintana Roo (Morgan-Martínez, C. 2020).

4 . 2 . 4 /

DOTACIÓN DE AGUA POTABLE

Con respecto a la dotación de agua potable, se entiende la cantidad de agua disponible por día entre la población de cada estado. En este sentido, la dotación en Campeche es de 91.7 litros por habitante al día (l/hab/d); en Quintana Roo es de 95.9 l/hab/d, y en Yucatán es de 86.5 l/hab/d siendo la dotación mas baja de la region (CONAGUA, 2019). Ahora bien, este es un reporte percapita, pero no subraya la importancia de la desigualdad en su acceso. En la misma ENIGH (INEGI, 2019) se reportan diferentes opciones de dotación a los hogares, siendo estas: 1. Diario, 2. Cada tercer día, 3. Dos veces por semana, 4. Una vez por semana, y 5. De vez en cuando.

En este sentido, acorde con el marco de Derecho Humano al Agua (ONU, 1987) la dotación de agua potable debería ser diaria de los cuales solo el 69% de los hogares en Campeche lo cumplen, el 95% en Yucatan y el 88% en Quintana Roo (Morgan-Martínez, C. 2020).

SITUACIÓN
DEL MANEJO Y
TRATAMIENTO
DEL AGUA
residual

4 . 3 . 1 /

COBERTURA DE RED DE
ALCANTARILLADO

Según los datos reportados por la CONAGUA (CONAGUA, 2019) que se basa en los datos reportados por el INEGI (2019), Quintana Roo es el estado que encabeza la cobertura de red de alcantarillado con 95.9%, en segundo lugar, se encuentra Campeche con el 91.7% de cobertura. En este caso, Yucatán se encuentra rezagado con respecto a la región con un 86.5% de cobertura de alcantarillado, el cual se encuentra por debajo del promedio de cobertura nacional, el cual es de 91.4%.

Se hace notar que dentro de la metodología del INEGI (2019) para llevar a cabo el Censo Nacional de Población y Vivienda – quinquenalmente– así como para el levantamiento de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH) se toma en cuenta los siguientes aspectos en la variable denominada “drenaje”: 1. Los hogares tienen conexión a la red pública,

2. Las descargas de vivienda son dirigidas a una fosa séptica, 3. Cuentan con una tubería que da a un barranco o grieta, 4. Las descargas son a un río, lago o mar o bien, 5. No cuentan con ninguna conexión. Efectivamente si se hace la suma de las primeras cuatro opciones, los porcentajes ascienden a más del 90 por ciento en cobertura. No obstante, si tomamos en consideración que solamente la primera opción es la óptima, es decir conexión a la red pública de drenaje y alcantarillado, los porcentajes de cobertura son paupérrimos: solo el 5% de las viviendas de Campeche cuentan con conexión al drenaje, en Yucatán sólo el 10% y en Quintana Roo el 2%. (Morgan-Martínez, C. 2020).

4 . 3 . 2 /

COBERTURA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

De igual forma, Quintana Roo va a la cabeza con relación a la cobertura de tratamiento de aguas residuales con un 51.1% y un caudal de tratamiento de 1,780 L/s; el caudal de tratamiento de Campeche es de 143 L/s con una cobertura de tratamiento de 7.2%, mientras que la cobertura de Yucatán es de 5.2% y un caudal de tratamiento de 231 L/s. La media nacional es de 64%, por lo que los tres estados se ubican por debajo de la media nacional oficial; de hecho, Campeche y Quintana Roo se encuentran al final de la lista de cobertura de tratamiento a nivel nacional para el año 2018 (CONAGUA, 2019). Es importante señalar que estos son datos oficiales, los cuales no consideran las plantas de tratamiento que no operan o que lo hacen deficientemente. Es presumible, derivado al abandono que ha sufrido el sector en los últimos 8 años, que el porcentaje de tratamiento de las aguas residuales a nivel nacional sea sustancialmente menor.

En la Figura 4.5 se muestra la ubicación de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el territorio nacional donde es evidente la falta de estas en la península de Yucatán.

4 . 3 . 3 /

DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES Y PTAR EXISTENTES

En Anexo se presentan tablas con las principales características de las PTAR existentes en los tres estados que conforman la península de Yucatán. En este apartado se presenta un resumen estadístico de las capacidades instaladas, el caudal tratado y las principales tecnologías observadas.

Campeche

En la Tabla 4.2 se exponen los permisos y volúmenes de descarga de aguas residuales a cuerpos de agua en 2021. Es importante puntualizar que no se tienen registrados títulos de descarga de origen doméstico en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), por lo que no se presenta en la tabla.

TABLA 4.2. PERMISOS Y VOLÚMENES DE DESCARGA DE AR VERTIDAS A CUERPOS DE AGUA RECEPTORES AL 2021 EN CAMPECHE

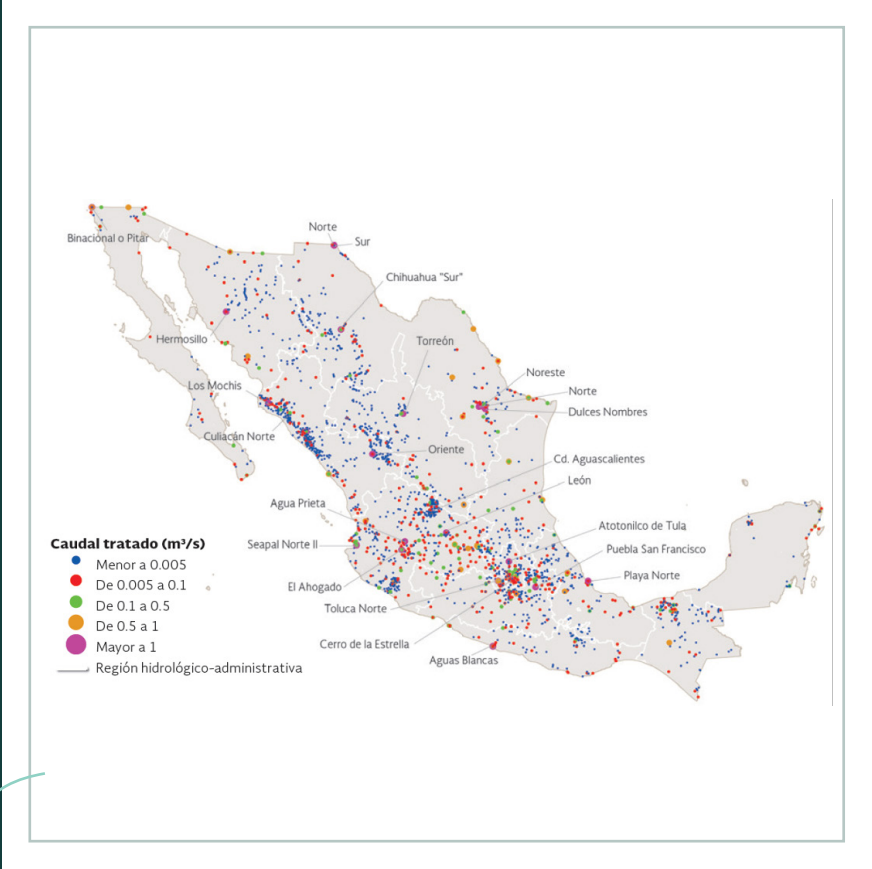


FIGURA 4.5 DISTRIBUCIÓN DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO. CONAGUA 2018. ESTADÍSTICAS DE AGUA EN MÉXICO.

C A M P E C H E

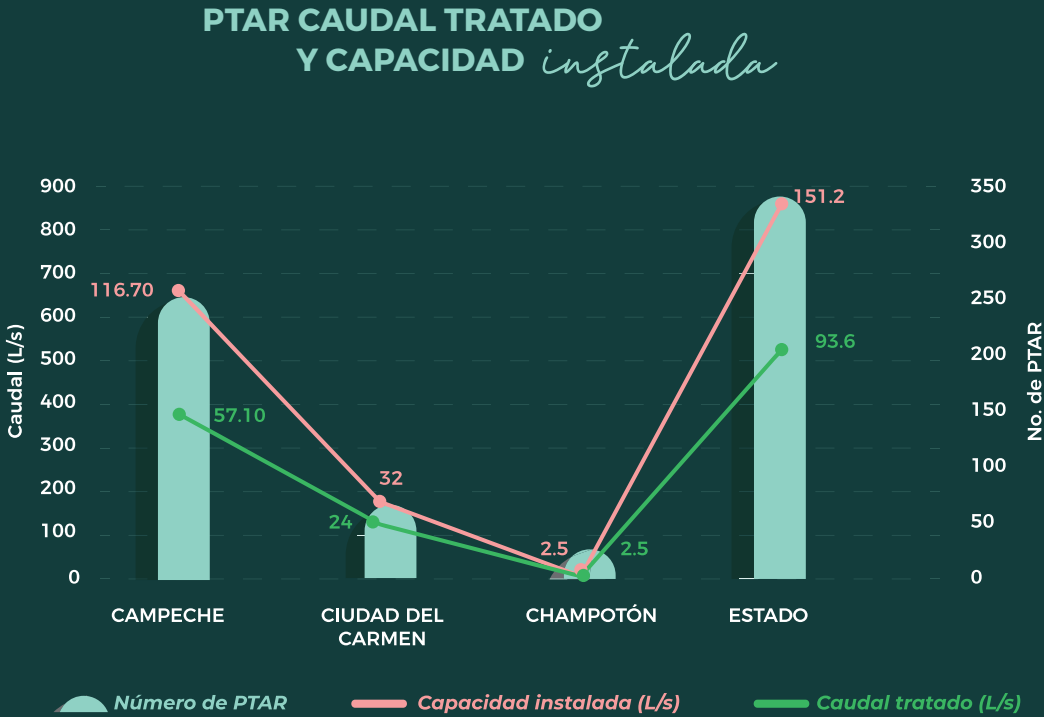
USO DEL AGUA ACUACULTURA 259 permisos DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES	33,360,101 volúmenes DE AGUA RESIDUALES VERTIDAS (m³/AÑO)	USO DEL AGUA PECUARIO 98 permisos DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES	88,487 volúmenes DE AGUA RESIDUALES VERTIDAS (m³/AÑO)
USO DEL AGUA AGROINDUSTRIAL 2 permisos DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES	24,960 volúmenes DE AGUA RESIDUALES VERTIDAS (m³/AÑO)	USO DEL AGUA PÚBLICO URBANO 20 permisos DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES	1,330,439 volúmenes DE AGUA RESIDUALES VERTIDAS (m³/AÑO)
USO DEL AGUA INDUSTRIAL 627 permisos DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES	125,537,828 volúmenes DE AGUA RESIDUALES VERTIDAS (m³/AÑO)	USO DEL AGUA SERVICIOS 2,599 permisos DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES	17,654,332 volúmenes DE AGUA RESIDUALES VERTIDAS (m³/AÑO)
USO DEL AGUA MÚLTIPLE 89 permisos DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES	1,687,635 volúmenes DE AGUA RESIDUALES VERTIDAS (m³/AÑO)	3,694 permisos DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES	179,683,782 volúmenes DE AGUA RESIDUALES VERTIDAS (m³/AÑO)

Fuentes: REPDA, 2021

TOTAL

Además, la Figura 4.6 se observa el número de PTAR, capacidad instalada y caudal tratado por municipio hasta 2018. De acuerdo con la información presentada, en el estado se tiene una subutilización de las PTAR del 38%. Por otro lado, la Figura 4.7 muestra el número de PTAR por tipo de tecnologías; el 79% de estas emplean tecnología de lodos activados. Finalmente, en la Figura 4.8 se muestra el cuerpo receptor del efluente de las PTAR, cuya predominancia es el acuífero Península de Yucatán con un 53%, además un 32% de las descargas es al mar.

FIGURA 4.6 NÚMERO DE PTAR, CAPACIDAD INSTALADA Y CAUDAL TRATADO (L/S) DE LAS PTAR MUNICIPALES EN CAMPECHE AL 2019
FUENTE: ADAPTADO DE CONAGUA,2019



PTAR POR TIPO
de tecnología

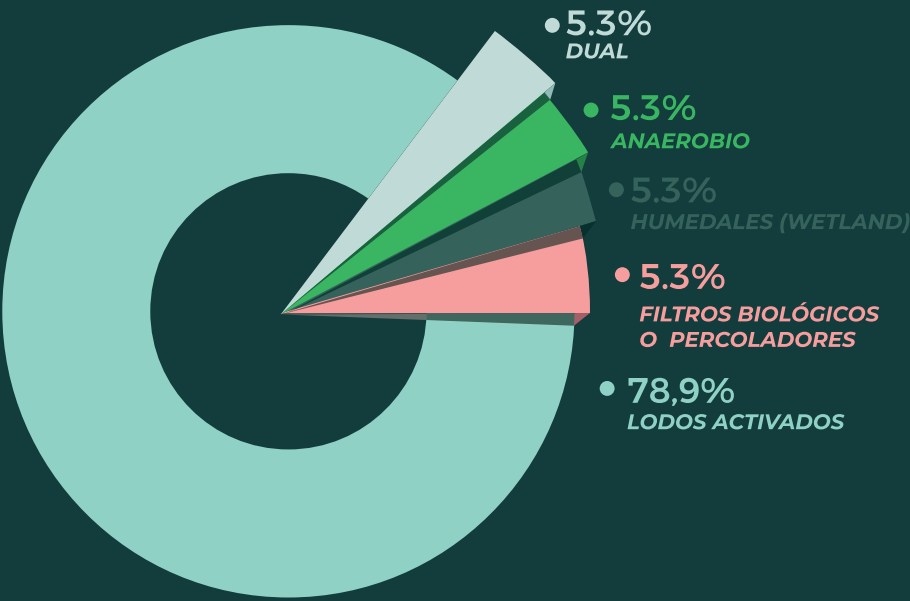


FIGURA 4.7 NÚMERO DE PTAR EN CAMPECHE POR TIPO DE TECNOLOGÍA AL 2019
FUENTE: ADAPTADO DE CONAGUA,2019

Cuerpo receptor
O REÚSO DEL EFLUENTE DE LAS PTAR

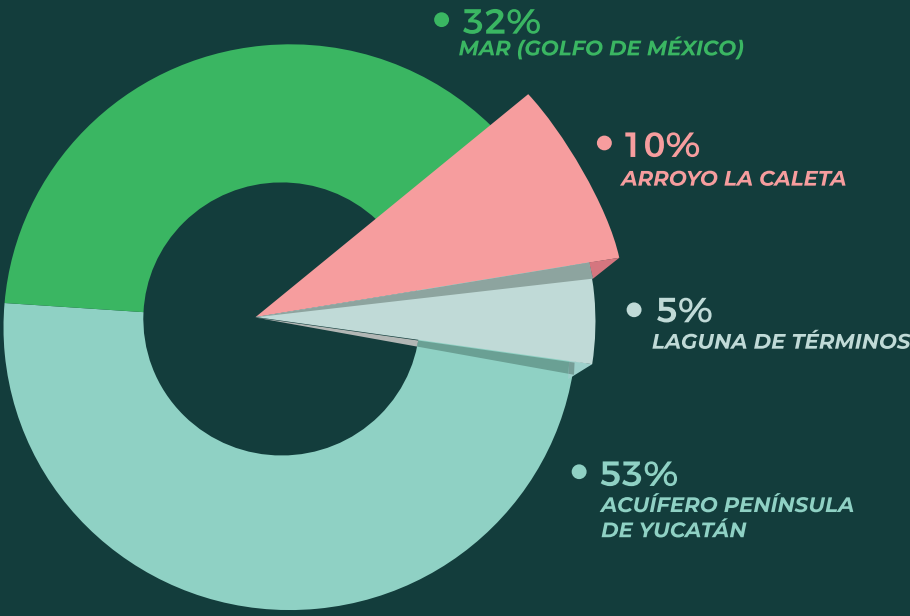


FIGURA 4.8 CUERPO RECEPTOR O REÚSO DEL EFLUENTE DE LAS PTAR EN CAMPECHE AL 2019
FUENTE: ADAPTADO DE CONAGUA,2019

Quintana Roo

En la Tabla 4.3 se exponen los permisos y volúmenes de descarga de aguas residuales a cuerpos de agua en 2021. Como se observa, en este caso, el mayor número de descargas y volúmenes de aguas residuales corresponde al uso de servicios,

TABLA 4.3 PERMISOS DE DESCARGA Y VOLÚMENES DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES VERTIDAS A CUERPOS DE AGUA RECEPTORES EN 2021 PARA QUINTANA ROO

Q U I N T A N A R O O

USO DEL AGUA ACUACULTURA

4 permisos
DE DESCARGA DE
AGUAS RESIDUALES

29,112

volúmenes
DE AGUA RESIDUALES
VERTIDAS (m³/AÑO)

USO DEL AGUA DOMÉSTICO

22 permisos
DE DESCARGA DE
AGUAS RESIDUALES

106,565

volúmenes
DE AGUA RESIDUALES
VERTIDAS (M3/AÑO)

USO DEL AGUA INDUSTRIAL

166 permisos
DE DESCARGA DE
AGUAS RESIDUALES

9,495,944

volúmenes
DE AGUA RESIDUALES
VERTIDAS (m³/AÑO)

USO DEL AGUA MÚLTIPLE

23 permisos
DE DESCARGA DE
AGUAS RESIDUALES

2,095,435

volúmenes
DE AGUA RESIDUALES
VERTIDAS (M3/AÑO)

Fuentes: REPDA, 2021



Asimismo, la Figura 4.9 presenta el número de PTAR, capacidad instalada y caudal tratado por municipio al 2018. De acuerdo con la información mostrada, la subutilización de las plantas del estado es del 33%. Además, en la Figura 4.10 se muestra el número de PTAR por tipo de tecnologías; de estas, el 69% emplean tecnología de lodos activados, seguido del 24% de plantas que son duales. Finalmente, en la Figura 4.11 se muestra el cuerpo receptor del efluente (o reúso) de las PTAR, casi la totalidad de las plantas descargan a acuífero, salvo una que reúsa el agua para riego de áreas verdes.

PTAR CAUDAL TRATADO
Y CAPACIDAD instalada

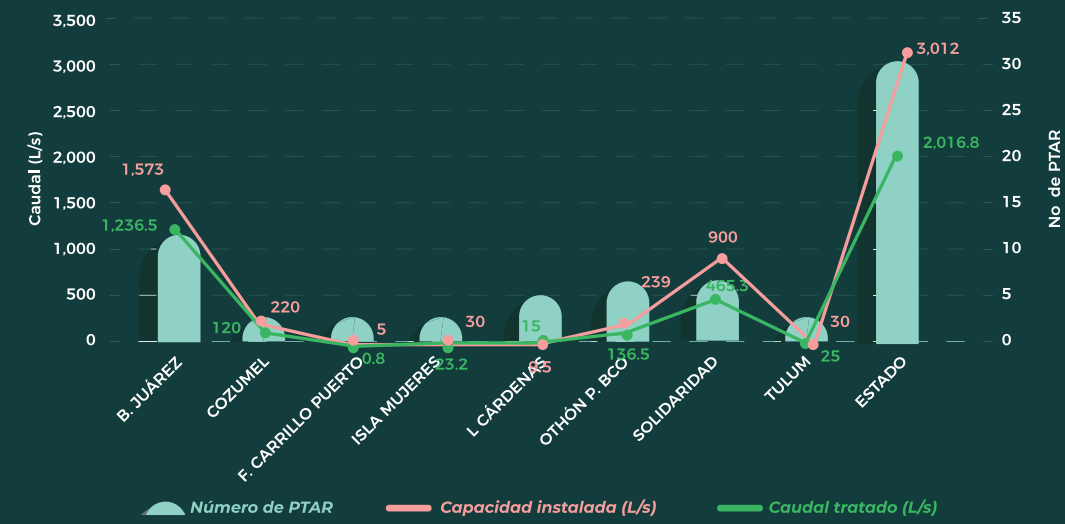


FIGURA 4.9 NÚMERO DE PTAR, CAPACIDAD INSTALADA Y CAUDAL TRATADO (L/S) DE LAS PTAR MUNICIPALES EN QUINTANA ROO AL 2019
FUENTE: ADAPTADO DE CONAGUA, 2019

PTAR POR TIPO
de tecnología

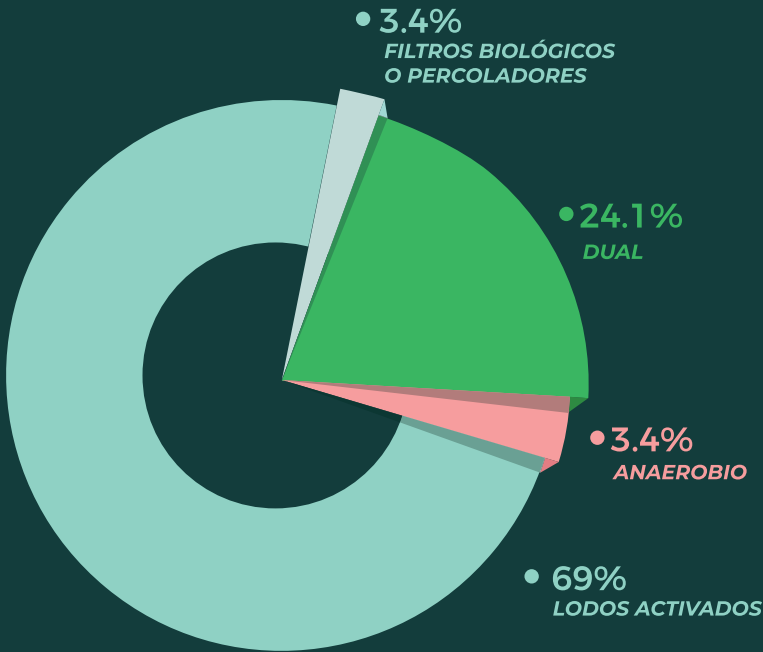


FIGURA 4.10 NÚMERO DE PTAR EN QUINTANA ROO POR TIPO DE TECNOLOGÍA AL 2019
FUENTE: ADAPTADO DE CONAGUA, 2019

Cuerpo receptor
O REÚSO DEL EFLUENTE DE LAS PTAR

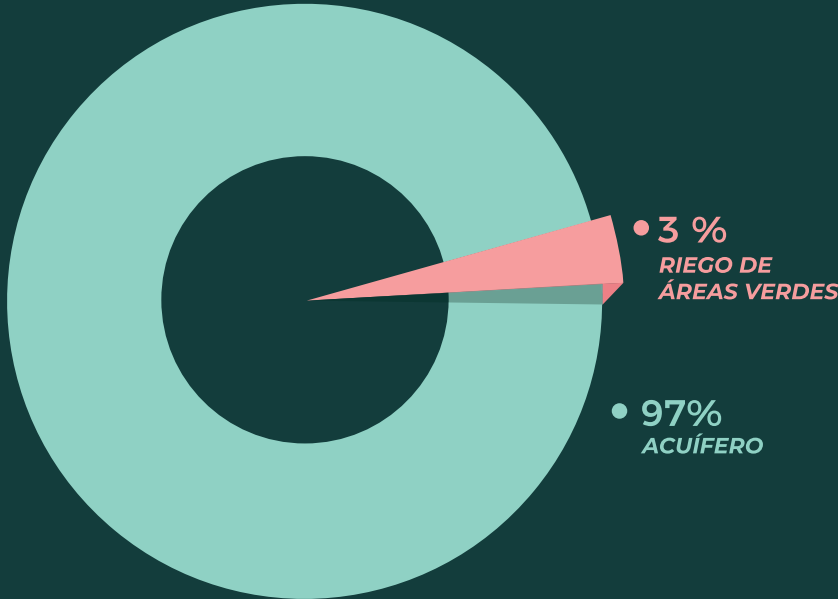


FIGURA 4.11 CUERPO RECEPTOR O REÚSO DEL EFLUENTE DE LAS PTAR EN QUINTANA ROO AL 2019
FUENTE: ADAPTADO DE CONAGUA,2019

Yucatán

En la Tabla 4.4 se exponen los permisos y volúmenes de descarga de aguas residuales a cuerpos de agua en 2021.

TABLA 4.4. PERMISOS DE DESCARGA Y VOLÚMENES DE DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES VERTIDAS A CUERPOS DE AGUA RECEPTORES EN 2021 PARA YUCATÁN

YUCATÁN

USO DEL AGUA ACUACULTURA

11 *permisos*
DE DESCARGA DE
AGUAS RESIDUALES

89,751

volúmenes
DE AGUA RESIDUALES
VERTIDAS (m³/AÑO)

USO DEL AGUA AGRÍCOLA

4 *permisos*
DE DESCARGA DE
AGUAS RESIDUALES

7,846

volúmenes
DE AGUA RESIDUALES
VERTIDAS (m³/AÑO)

USO DEL AGUA DOMÉSTICO

6 *permisos*
DE DESCARGA DE
AGUAS RESIDUALES

139,351

volúmenes
DE AGUA RESIDUALES
VERTIDAS (m³/AÑO)

USO DEL AGUA INDUSTRIAL

1,109 *permisos*
DE DESCARGA DE
AGUAS RESIDUALES

24,694,453

volúmenes
DE AGUA RESIDUALES
VERTIDAS (m³/AÑO)

USO DEL AGUA MÚLTIPLE

575 *permisos*
DE DESCARGA DE
AGUAS RESIDUALES

5,313,101
volúmenes
DE AGUA RESIDUALES
VERTIDAS (m³/AÑO)

USO DEL AGUA PECUARIO

503 *permisos*
DE DESCARGA DE
AGUAS RESIDUALES

5,052,534
volúmenes
DE AGUA RESIDUALES
VERTIDAS (m³/AÑO)

USO DEL AGUA PÚBLICO URBANO

69 *permisos*
DE DESCARGA DE
AGUAS RESIDUALES

6,361,849
volúmenes
DE AGUA RESIDUALES
VERTIDAS (m³/AÑO)

USO DEL AGUA SERVICIOS

2,470 *permisos*
DE DESCARGA DE
AGUAS RESIDUALES

11,849,972
volúmenes
DE AGUA RESIDUALES
VERTIDAS (m³/AÑO)

4,747

permisos
DE DESCARGA DE
AGUAS RESIDUALES

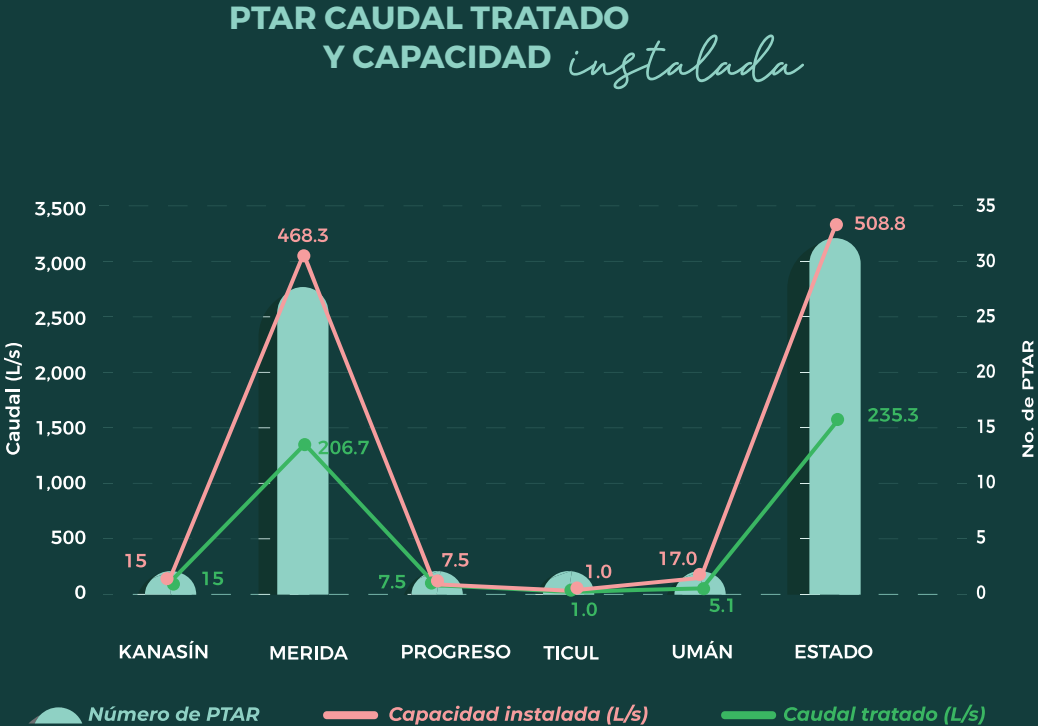
53,508,857

volúmenes
DE AGUA RESIDUALES
VERTIDAS (m³/AÑO)

TOTAL

En la Figura 4.12 se exhibe el número de PTAR, capacidad instalada y caudal tratado por municipio al 2018. De acuerdo con la información mostrada, se tiene una subutilización en las plantas del estado del 54%. Por otro lado, en la Figura 4.13 se encuentra el número de PTAR por tipo de tecnologías; de estas, el 62% de las PTAR utiliza lodos activados, mientras que el 31% de ellas cuenta con tecnología anaerobia. Finalmente, en este caso, todas las PTAR descargan al acuífero.

FIGURA 4.12 NÚMERO DE PTAR. CAPACIDAD INSTALADA Y CAUDAL TRATADO (L/S) DE LAS PTAR MUNICIPALES EN YUCATÁN AL 2019
FUENTE: ADAPTADO DE CONAGUA, 2019



PTAR POR TIPO
de tecnología

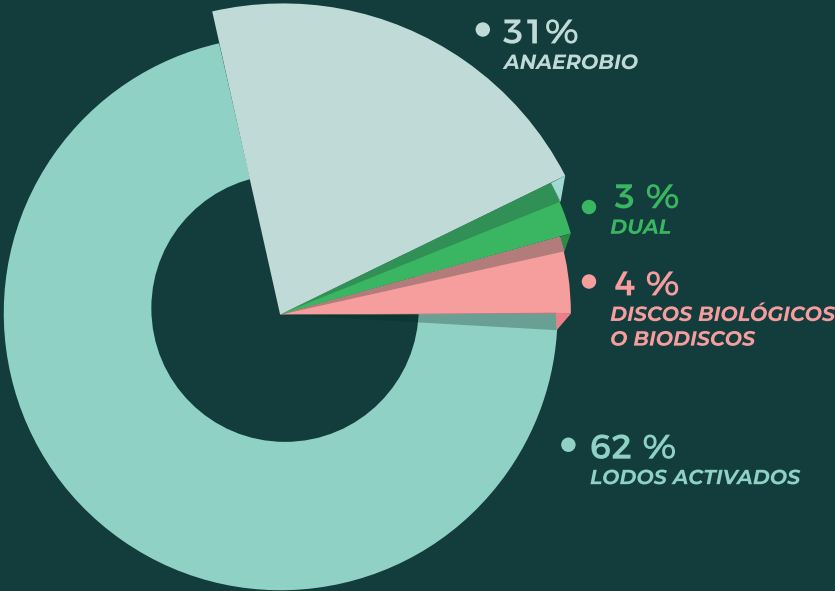


FIGURA 4.13 NÚMERO DE PTAR EN YUCATÁN POR TIPO DE TECNOLOGÍA AL 2019
FUENTE: ADAPTADO DE CONAGUA,2019

Es de resaltar que para los tres estados, la tecnología que ha sido seleccionada en una clara mayoría es la de lodos activados. Como se ha comentado con anterioridad, esta tecnología es muy eficaz para el tratamiento de las aguas residuales, siempre y cuando, se tengan los recursos técnicos y económicos necesarios y suficientes para su operación y mantenimiento, aspecto, que en general, no es así en la mayoría de los municipios de la región. Derivado de esta condición, es presumible que muchas plantas de tratamiento, con esta tecnología, no están en funcionamiento u operan con deficiencias.

ASPECTOS
socioeconómicos

4 . 4 . 1
POBLACIÓN POR MUNICIPIO

Campeche

Hasta el 2020, Campeche tenía una población de 928,363 habitantes en 12 municipios. Los municipios más importantes son: Campeche, Carmen y Champotón con casi el 70 por ciento de la población del estado, como se observa en la Figura 4.14. Por otro lado, la Figura 4.15 presenta los municipios por número de habitantes, como se observa, la mayoría de los municipios (58%) tiene una población entre 25 y 100 mil habitantes.

POBLACIÓN DE LOS PRINCIPALES municipios

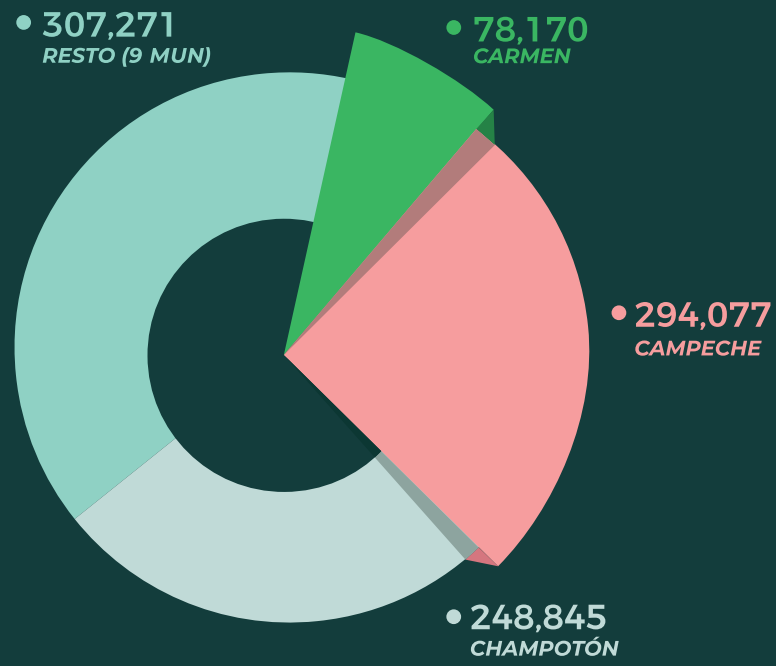


FIGURA 4.11 POBLACIÓN DE LOS PRINCIPALES MUNICIPIOS DE CAMPECHE AL 2020
FUENTE: ADAPTADO DE INEGI, 2020 (1)

MUNICIPIOS POR
NÚMERO DE habitantes

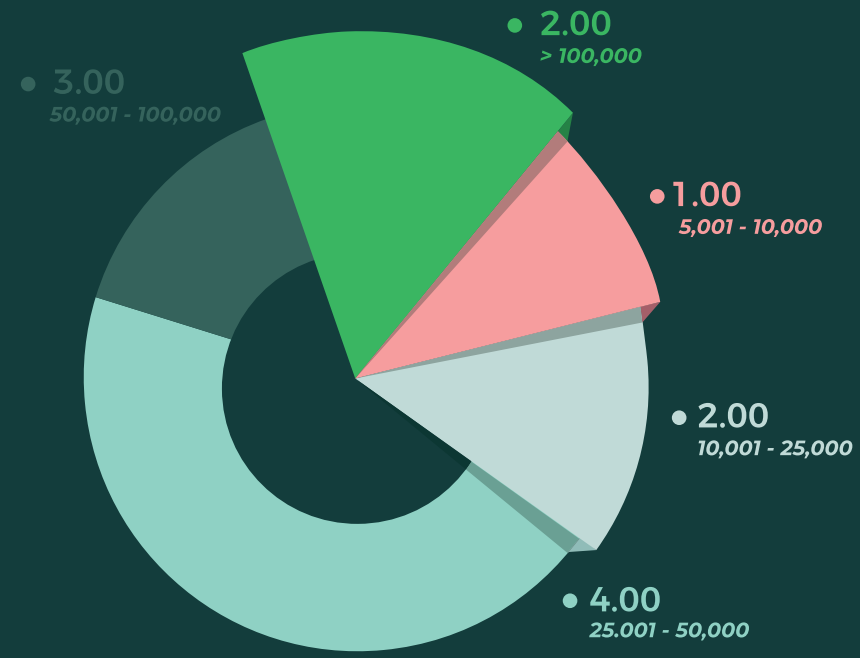


FIGURA 4.15 MUNICIPIOS POR POBLACIÓN EN CAMPECHE AL 2020
FUENTE: ADAPTADO DE INEGI, 2020 (1)

Grado de urbanización

En 2020, del total de la población del estado, el 25% vive en localidades rurales (de menos de 2,500 habitantes), mientras que el 75% vive en localidades urbanas. En Campeche hay 2,729 localidades rurales y 33 urbanas (cuentame.inegi.org.mx).

Quintana Roo

Quintana Roo es un estado con 11 municipios y con una población de 1,857,985 habitantes hasta el 2020. De acuerdo con la Figura 4.16, tres municipios concentran el 80% de la población: Benito Juárez, Othón P. Blanco y Solidaridad. Además, casi la mitad de los municipios (46%) tiene entre 25 y 50 mil habitantes (Figura 4.17).

POBLACIÓN DE LOS PRINCIPALES municipios

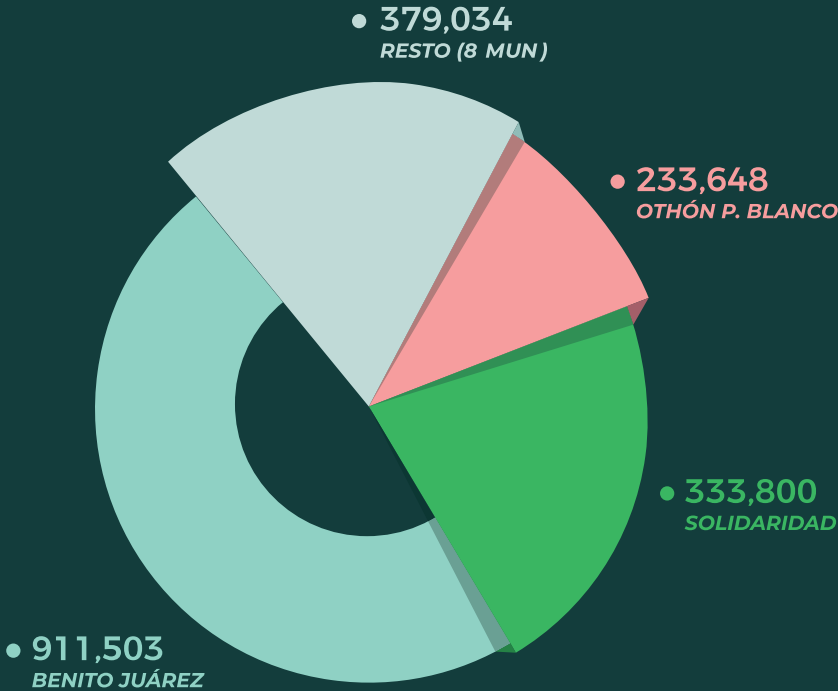


FIGURA 4.16 POBLACIÓN DE LOS PRINCIPALES MUNICIPIOS DE QUINTANA ROO AL 2020
FUENTE: ADAPTADO DE INEGI, 2020 (2)

MUNICIPIOS POR
NÚMERO DE habitantes

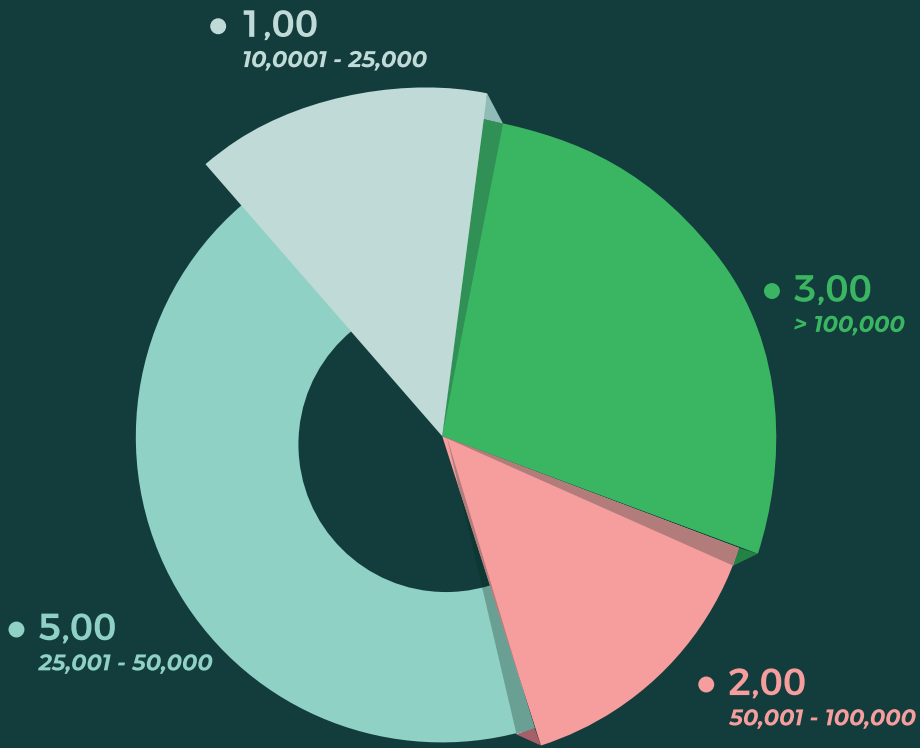


FIGURA 4.15 MUNICIPIOS POR POBLACIÓN EN QUINTANA ROO AL 2020
FUENTE: ADAPTADO DE INEGI, 2020 (2)

Grado de urbanización

Del total de la población del estado -hasta 2020-, el 10% vive en localidades de menos de 2,500 habitantes, es decir, rurales; mientras que el 90% vive en localidades urbanas. En Quintana Roo hay 2,180 localidades rurales y 27 urbanas (cuentame.inegi.org.mx).

Yucatán

Hasta 2020, la población de Yucatán era de 2,320,898 habitantes. Además, a diferencia de Campeche y Quintana Roo, Yucatán es un estado con más de cien municipios (106), de los cuales, Mérida concentra más del 40% de la población, los siguiente municipios por número de habitantes son Kanasín, Valladolid, Tizimín, Progreso y Umán como se observa en la Figura 4.18. Por otro lado, en la Figura 4.19 se muestran los municipios por número de habitantes; en este caso, el 45% de ellos tienen una población menor a 5 mil habitantes.

POBLACIÓN DE LOS PRINCIPALES municipios

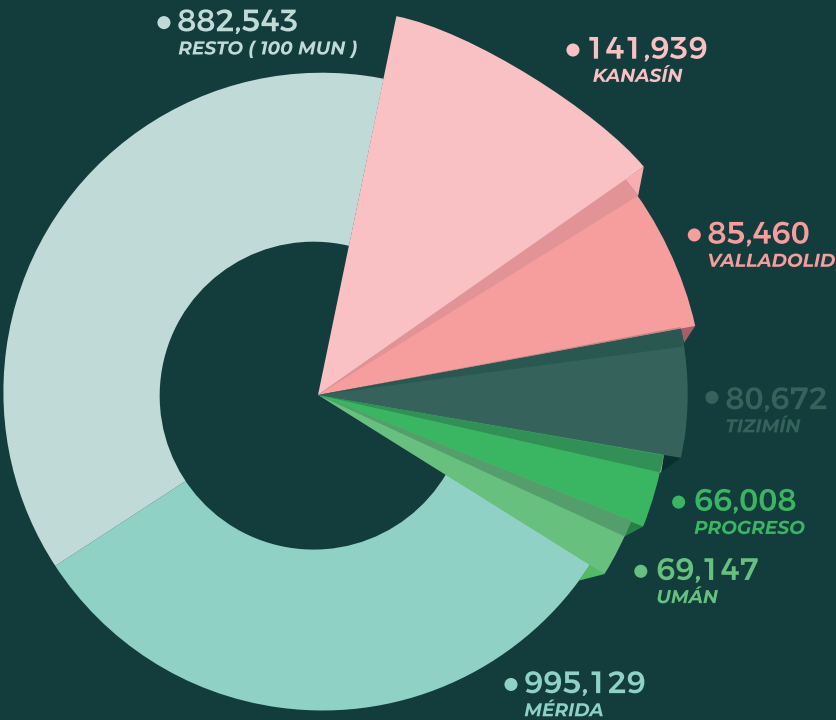


FIGURA 4.18 POBLACIÓN DE LOS PRINCIPALES MUNICIPIOS DE YUCATÁN AL 2020
FUENTE: ADAPTADO DE INEGI, 2020 (3)

MUNICIPIOS POR
NÚMERO DE *habitantes*

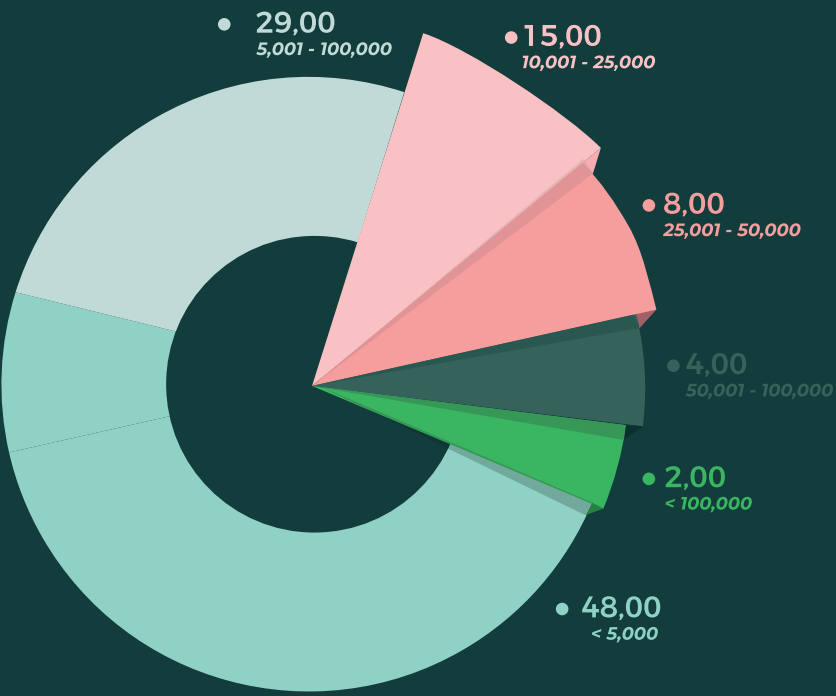


FIGURA 4.19 MUNICIPIOS POR POBLACIÓN EN YUCATÁN AL 2020
FUENTE: ADAPTADO DE INEGI, 2020 (3)

Grado de urbanización

Del total de la población del estado -hasta 2020-, el 14% vive en localidades de menos de 2,500 habitantes, es decir, rurales; mientras que el 86% vive en localidades urbanas. En Yucatán hay 2,322 localidades rurales y 112 urbanas (cuentame.inegi.org.mx).

4 . 4 . 2 /

ECONOMÍA

Campeche

Hasta 2019, las actividades secundarias (minería que se refiere básicamente a la industria petrolera, generación/distribución de energía eléctrica y construcción), representaban la mayor participación del Producto Interno Bruto del estado (PIBE) con un 84.11% (435 mil millones de pesos, base 2013), ya que la principal actividad económica del estado es la actividad extractiva (minería) de petróleo crudo y gas natural. En 2010, Campeche producía el 68.6% del petróleo crudo y el 33.3% del gas natural a nivel nacional, ocupando el primer lugar nacional como productor de ambos bienes. Las actividades terciarias como servicios inmobiliarios y el comercio al por menor y al por mayor contribuyeron con 76.5 mil millones de pesos, lo que representó el 14.8%, mientras que las actividades primarias (agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal) tan sólo representaron el 1.11% del PIBE (5.7 mil millones de pesos). En la Figura 4.20 se observa el desglose del PIB de las principales actividades y el porcentaje que aporta cada una al estado.

PIBE PRINCIPALES actividades

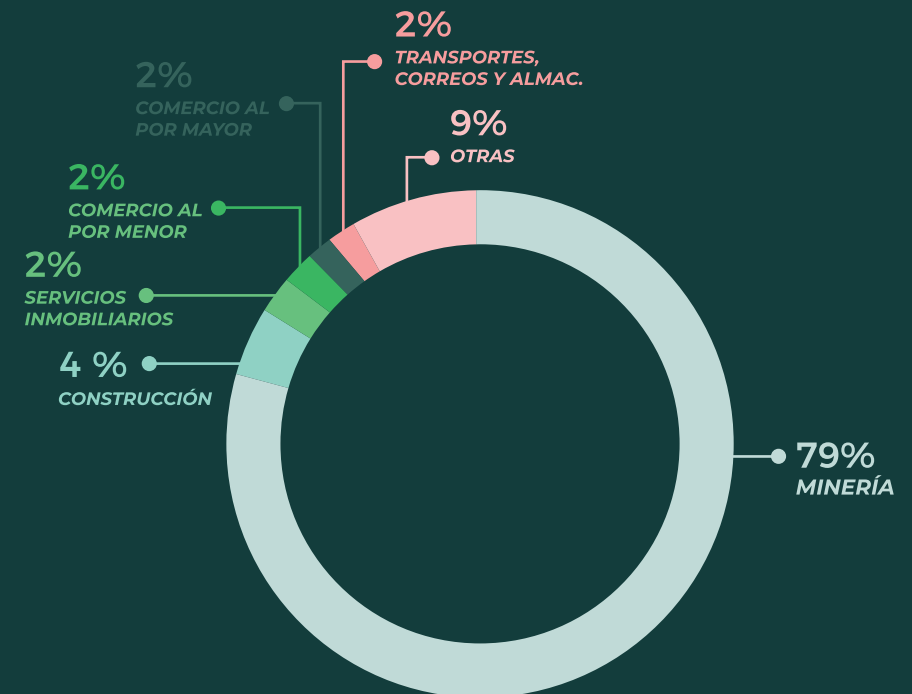


FIGURA 4.20 PARTICIPACIÓN DE LAS PRINCIPALES ACTIVIDADES ECONÓMICAS EN EL PIB DE CAMPECHE

FUENTE: ADAPTADO DE INEGI (SISTEMA DE CUENTAS NACIONALES DE MÉXICO)

Actividad agrícola

Del total de las unidades de producción nacional, entre 2016 y 2017, Campeche tenía el 1.4%, de las cuales, el 94.5 por ciento corresponden a unidades agrícolas. La superficie agrícola es de 799,726.62 hectáreas; de las cuales, el 90% corresponde a agricultura de temporal y el resto a riego (INEGI, 2017 (4)). Hasta septiembre de 2020 -año agrícola 2020- (SIAP), el principal cultivo del estado es el maíz grano con 186,606 ha y una producción de 31,719 ton, seguido de soya, sorgo y arroz palay. La superficie total sembrada (2020) es de 284,307 ha, mientras que la cosechada hasta octubre de 2020 fue de 48,756 ha.

Ganadería

El principal tipo de ganado que se produce en Campeche es el ganado bovino para producción de carne con un valor de producción de 1 mil millones de pesos y 662 mil cabezas, seguido de carne de ave. Su producción de miel y cera de abeja coloca a Campeche en el sexto lugar por volumen de producción. El valor total de la producción pecuaria es de 2.7 mil millones de pesos (SIAP).

Industria

La industria manufacturera tiene una participación muy pequeña: 0.51% del PIB, lo que corresponde a 2.6 mil millones de pesos. La industria alimentaria y de bebidas son las principales industrias del estado con una participación del 44 y 11.5 por ciento, respectivamente; lo que corresponde a 1.45 mil millones de pesos, así como la industria textil con una participación del 28% y 728 millones de pesos (INEGI, Sistema de Cuentas Nacionales).

Turismo

Las actividades relacionadas con servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas tan sólo representa el 0.81% del PIB, lo que se traduce en 4.2 mil millones de pesos al 2019. A nivel nacional, la participación porcentual de Campeche en este rubro es del 1% (INEGI, Sistema de Cuentas Nacionales).

Quintana Roo

Las terciarias son las principales actividades del estado hasta el año 2019, con 255 mil millones de pesos (base 2013) y una participación del 88% del PIBE. Las principales actividades terciarias son las relacionadas con el turismo, como los servicios de alojamiento, preparación de alimentos y bebidas, servicios inmobiliarios y comercio al por menor. Por otra parte, las actividades secundarias contribuyen con el 11.3% del PIB estatal (32.7 mil millones de pesos), mientras que, las actividades agropecuarias (primarias) tan sólo aportan 2.1 mil millones de pesos (0.72%) al PIBE. En ese sentido, Quintana Roo es un estado atípico. En la Figura 4.21 se presentan las principales actividades y su aportación al PIB estatal.

PIBE PRINCIPALES actividades

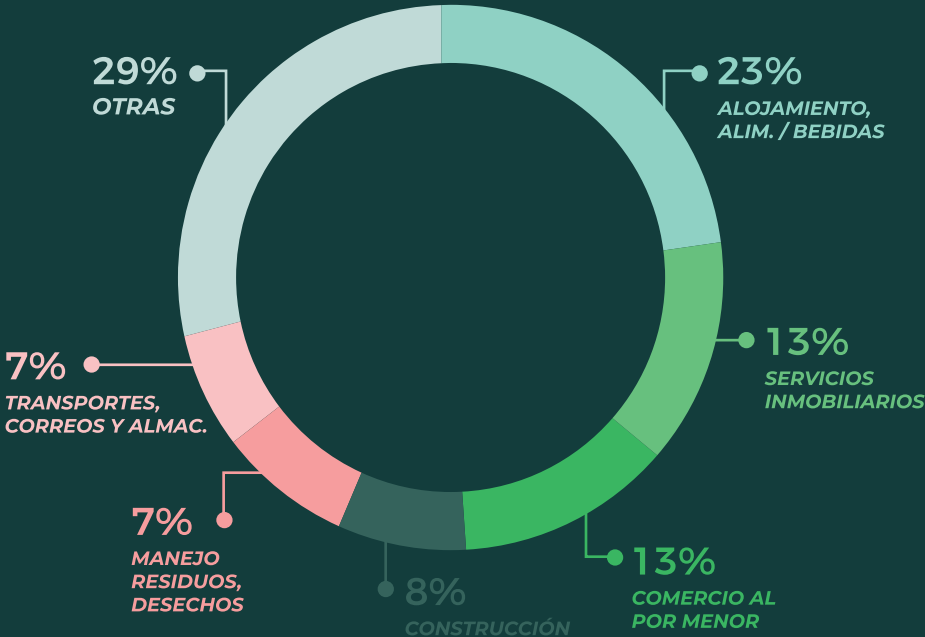


FIGURA 4.21 PARTICIPACIÓN DE LAS PRINCIPALES ACTIVIDADES ECONÓMICAS EN EL PIB DE QUINTANA ROO
 FUENTE: ADAPTADO DE INEGI (SISTEMA DE CUENTAS NACIONALES DE MÉXICO)

Actividad agrícola

De 2016 a 2017, Quintana Roo tenía el 1.77% de las unidades de producción del porcentaje nacional, de las cuales el 99.69% son agrícolas, con una superficie de 550,897.42 hectáreas. De éstas, el 96.7% corresponden a agricultura de temporal (INEGI, 2017 (4)).

Durante el año agrícola 2020- (SIAP), el principal cultivo del estado es el maíz grano con 57,702 ha y una producción de 18,421 ton, con mucha menor superficie, el sorgo grano y el elote son los siguientes cultivos por superficie sembrada. La superficie total sembrada (2020) es de 71,323 ha, mientras que la cosechada hasta octubre de 2020 fue de 24,370 ha.

Ganadería

El principal tipo de ganado en el estado es el bovino con un valor de producción de 316.95 millones de pesos y 122.8 mil cabezas. Casi a la par se encuentran el ganado porcino y el avícola para producción de carne con 237 millones de pesos. El valor de la producción pecuaria es de 1 mil millones de pesos (SIAP).

Industria

Hasta 2019, la participación de la industria manufacturera en el estado es de solo 1.84% del PIB, la cual equivale a 5.3 mil millones de pesos. Dentro de esta, la industria alimentaria tiene una participación del 54.9% (2.9 mil millones), seguida de la fabricación de productos a base de minerales no metálicos y la industria de las bebidas con el 16.7 y 5.7%, respectivamente (INEGI, Sistema de Cuentas Nacionales).

Turismo

Las actividades relacionadas con servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas representan el 22.9% del PIB, lo que se traduce en 66.4 mil millones de pesos al 2019. La participación porcentual de Quintana Roo en este rubro es del 16% y representa el primer lugar a nivel nacional (INEGI, Sistema de Cuentas Nacionales).

Yucatán

Al año 2019, las actividades terciarias tienen la mayor participación en el PIB estatal con un 69.7% y 184.2 mil millones de pesos. Las actividades secundarias representan el 26.6% del PIB (70.2 mil millones de pesos). Por su parte, aunque, las actividades primarias aportan tan sólo un 3.8% del PIB con 9.99 mil millones de pesos, tienen una mayor participación que en el resto de la región. En la Figura 4.22 se presentan las principales actividades y su aportación al PIB del estado. Como se observa, Yucatán presenta una economía más diversificada que el resto de la península, la cual no depende de un solo tipo de producto o servicio.

PIBE PRINCIPALES actividades

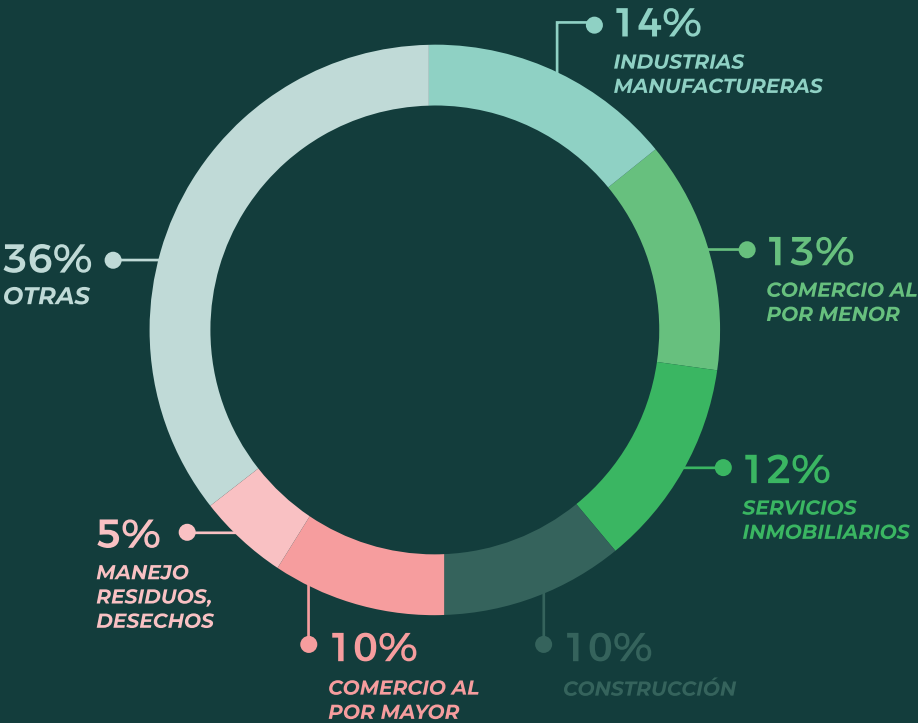


FIGURA 4.22 PARTICIPACIÓN DE LAS PRINCIPALES ACTIVIDADES ECONÓMICAS EN EL PIB DE YUCATÁN
FUENTE: ADAPTADO DE INEGI (SISTEMA DE CUENTAS NACIONALES DE MÉXICO)

Actividad agrícola

Entre 2016-2017, Yucatán contaba con 1.69 unidades de producción, de las cuales, el 96.44% correspondían a unidades agrícolas y una superficie de 660,102 ha. De éstas, el 90% pertenecían a agricultura de temporal y el resto a riego (INEGI, 2017 (4)).

De acuerdo con el SIAP, en el presente año agrícola, el pepino representa la mayor producción en el estado con 33 mil toneladas y una superficie de 751 ha, mientras que la mayor superficie sembrada corresponde a maíz grano con 110 mil ha y una producción de 30.2 mil toneladas; la calabacita y la soya son los siguientes cultivos por producción y superficie sembrada, respectivamente. Yucatán es el sexto productor de pepino y el segundo de berenjena del país. Hasta septiembre de 2020, la superficie total sembrada es de 126 mil toneladas.

Ganadería

Con 6.8 mil millones de pesos, el ganado bovino para la producción de carne representa el mayor valor de la producción del estado con 1.1 millones de cabezas, seguido de la avicultura para producción de carne con 5 mil millones de pesos y 21.2 millones de cabezas; el ganado porcino cuenta con 7.3 millones y un valor de producción de 2 mil millones de pesos, valor similar a la producción de ganado para producción de leche. El valor total de la producción es de 17 mil millones de pesos (SIAP).

Industria

Con una participación del 14% dentro del PIB y 37.1 mil millones de pesos, la industria manufacturera representa la principal actividad económica del estado hasta el año 2019. Dentro de ésta, las más importantes son la industria alimentaria y de bebidas, con el 66.7 y 6.5%, respectivamente, y 27.1 mil millones de pesos. Las industrias de fabricación de maquinaria y equipo y de fabricación de productos con base en minerales no metálicos contribuyen con el 5.7 y el 5.4% (INEGI, Sistema de Cuentas Nacionales).

Turismo

Las actividades relacionadas con servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas representan únicamente el 2.3% del PIB, lo que se traduce en 5.9 mil millones de pesos al 2019. A nivel nacional, la participación porcentual de Yucatán en este rubro es del 1.4% (INEGI, Sistema de Cuentas Nacionales).

DESCRIPCIÓN DE LA *problemática*

La Península de Yucatán comparte una situación hidrogeográfica particular debido al suelo cárstico de la zona, el cual es altamente permeable y, debido a lo cual, la existencia de cuerpos de agua superficiales es prácticamente nula. Gracias a la alta precipitación media anual a la baja densidad de población combinado con el suelo cárstico que posee, la Península de Yucatán tiene un bajo grado de presión hídrica: 17% (SINA-CONAGUA). Sin embargo, debido a esta particularidad, es también altamente susceptible a la contaminación debido a un mal manejo y tratamiento de las aguas residuales.

La región también comparte la dinámica poblacional, ya que, grandes ciudades en particular, concentran a una gran cantidad de población como Campeche y Ciudad del Carmen en Campeche, Cancún en Quintana Roo, y sobretodo Mérida en Yucatán, las cuales concentran más del 40% de la población del estado, teniendo Yucatán el 94% de los municipios menos de la mitad de la población que ostenta el municipio de Mérida.

La diferencia principal de cada uno de los estados es su dinámica económica, ya que en dos de ellos, Campeche y Quintana Roo, es una actividad la que, prácticamente

sostiene la economía del estado, el petróleo y el turismo, respectivamente, mientras que Yucatán cuenta con una economía más diversificada, la cual está basada en la industria manufacturera, el comercio, los servicios inmobiliarios y la construcción con una mayor participación de las actividades agropecuarias a diferencia de Campeche y Quintana Roo.

En relación con el manejo de las aguas residuales en la península se puede resumir la problemática en lo siguiente:

- | *Precaria cobertura de redes de drenaje.*
- | *Utilización generalizada de fosas sépticas.*
- | *Descargas de aguas residuales crudas al subsuelo.*
- | *Desiminación de la contaminación en los acuíferos por la naturaleza cárstica del suelo.*
- | *Escasas plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.*
- | *Selección tecnológica orientada al sistema de lodos activados, altamente demandante de energía y recursos económicos para su operación.*

- | Selección tecnológica orientada al sistema de lodos activados, altamente demandante de energía y recursos económicos para su operación.
- | Nulo cumplimiento de la normatividad vigente y necesaria para la protección del acuífero.
- | Alta condición de marginación y pobreza en la población.
- | Dificultad técnica y económica para dar cumplimiento a la normatividad vigente en materia de descarga de aguas residuales a cuerpos de agua y al proyecto de modificación d la NOM-001-SEMARNAT-1996.

RESUMEN DE VISITA Y LEVANTAMIENTO TÉCNICO DE SIETE PLANTAS DE TRATAMIENTO VISITADAS EN EL ESTADO DE

Quintana Roo

Entre el 28 de septiembre y 01 de octubre del 2020, se visitaron 7 plantas de tratamiento de aguas residuales en el estado de Quintana Roo. Es claro que una muestra tan pequeña no es significativa para sacar conclusiones; sin embargo sirve como experiencia para conocer de cerca el panorama de la situación de las plantas de tratamiento de aguas residuales de la región, así como para entender algunos de los retos a los que se enfrentan los operadores de las plantas tratadoras. En la Tabla 4.5 se muestra un resumen de las plantas visitadas y sus principales características.

TABLA 4.5. RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS PTAR VISITADAS

HOTEL HILTON

PLAYA DEL CARMEN

NOMBRE PTAR

PLAYA DEL CARMEN

LOCALIDAD

7

CAUDAL DISEÑO (L/S)

NOM-001-SEMARNAT-1996
(150, 150)*

NORMA DE DESCARGA

POZO DE ABSORCIÓN

CUERPO DE DESCARGA

LODOS ACTIVADOS

TECNOLOGÍA

PUERTO AVENTURAS

PUERTO AVENTURAS

NOMBRE PTAR

PUERTO AVENTURAS

LOCALIDAD

30

CAUDAL DISEÑO (L/S)

NOM-001-SEMARNAT-1996
(150, 150)*

NORMA DE DESCARGA

POZO DE ABSORCIÓN

CUERPO DE DESCARGA

FILTRO PERCOLADOR

TECNOLOGÍA

PRIMER CENTENARIO

NOMBRE PTAR

CHETUMAL

LOCALIDAD

180

CAUDAL DISEÑO (L/S)

CHEMUYIL

NOMBRE PTAR

CHEMUYIL

LOCALIDAD

30

CAUDAL DISEÑO (L/S)

AKUMAL

NOMBRE PTAR

AKUMAL

LOCALIDAD

40

CAUDAL DISEÑO (L/S)

NOM-001-SEMARNAT-1996
(150, 150)*

NORMA DE DESCARGA

POZO DE ABSORCIÓN

CUERPO DE DESCARGA

LODOS ACTIVADOS

TECNOLOGÍA

NOM-001-SEMARNAT-1996
(150, 150)*

NORMA DE DESCARGA

POZO DE ABSORCIÓN

CUERPO DE DESCARGA

LODOS ACTIVADOS

TECNOLOGÍA

NOM-001-SEMARNAT-1996
(150, 150)*

NORMA DE DESCARGA

POZO DE ABSORCIÓN

CUERPO DE DESCARGA

LODOS ACTIVADOS

TECNOLOGÍA

* 150 mgDBO/L, 150 mgSST/L

HOTEL EL CID

NOMBRE PTAR

PUERTO MORELOS

LOCALIDAD

15

CAUDAL DISEÑO (L/S)

NOM-001-SEMARNAT-1997

(150, 150)*

NORMA DE DESCARGA

RIEGO INTERNO

CUERPO DE DESCARGA

LODOS ACTIVADOS

TECNOLOGÍA

CASCO ANTIGUO

NOMBRE PTAR

PUERTO MORELOS

LOCALIDAD

15

CAUDAL DISEÑO (L/S)

NOM-001-SEMARNAT-1996

(150, 150)*

NORMA DE DESCARGA

POZO DE ABSORCIÓN

CUERPO DE DESCARGA

LODOS ACTIVADOS

TECNOLOGÍA

De las PTAR visitadas, cinco son plantas de tratamiento municipales, de las cuales, tres están administradas por un organismo operador público (CAPA), mientras que las dos restantes las opera un organismo operador privado (Aguakán). Además, se visitaron dos PTAR privadas que dan servicios a hoteles.

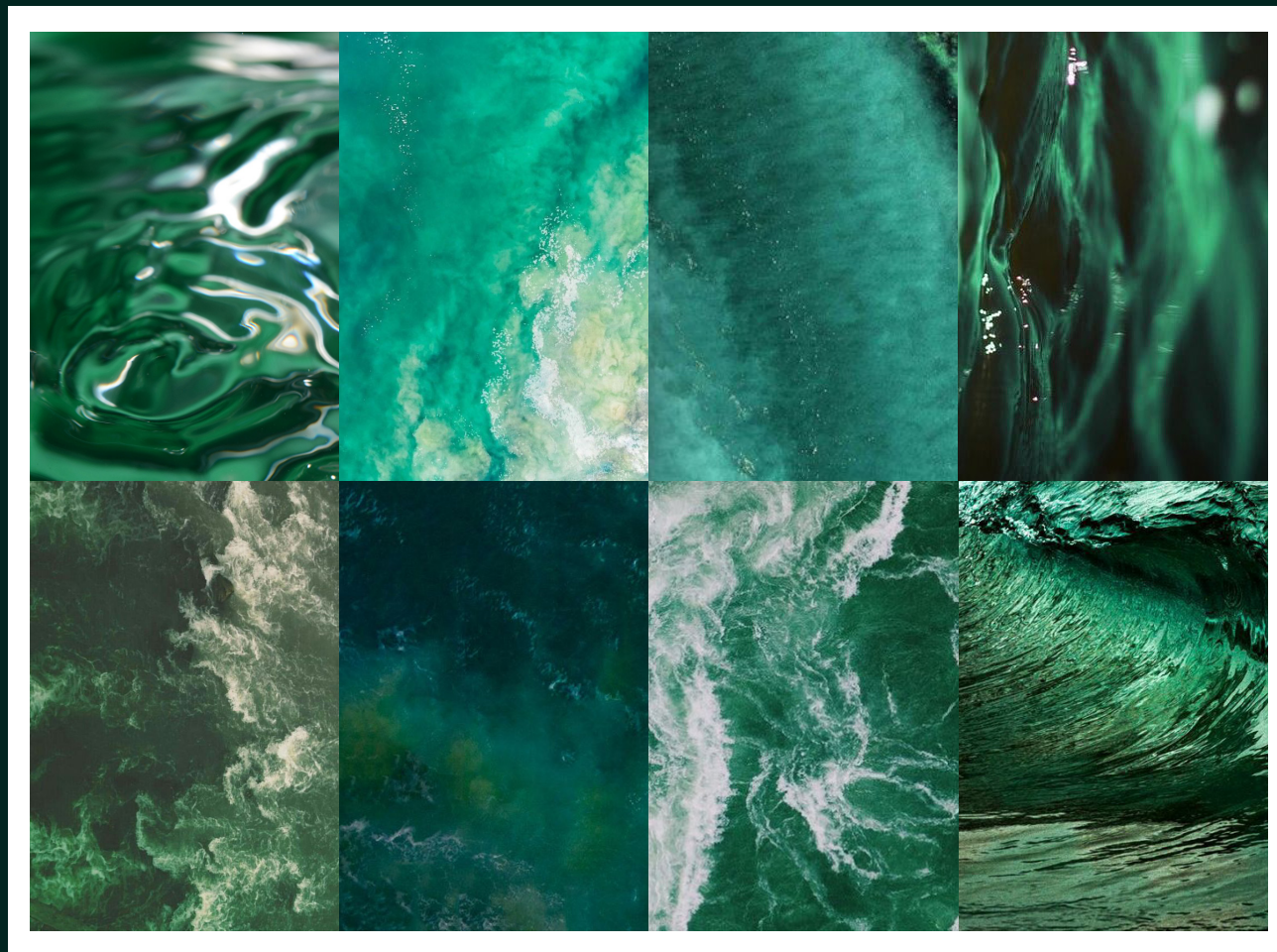
De las visitas a las PTAR del estado de Quintana Roo, se observa lo siguiente:

- | Las plantas municipales están altamente mecanizadas, lo cual representa un reto debido a los altos costos de mantenimiento y falta de personal capacitado para reparar/mantener los equipos mecánicos.
- | Hace falta capacitación y motivación a los operadores, mejorando también sus condiciones laborales. Existe mucha rotación de personal. Los operadores no ven como una buena opción laboral el trabajar en una PTAR, ya que es mucho trabajo para el cual no están adecuadamente capacitados y la remuneración es baja.

* 150 mgDBO/L, 150 mgSST/L

- | *Los costos energéticos son muy altos, lo que para un proceso de lodos activados elevan de manera importante los costos operativos. Lo anterior provoca que los equipos de mayor consumo energético, como son los sopladores sean parados en las horas pico, lo anterior en perjuicio del proceso biológico.*
- | *La norma de diseño predominate es la NOM-001-SEMARNAT-1996 en su variante 150, 150, la cual requiere concentraciones de DBO y SST en el efluente de 150 mg/L. Dicha calidad es muy laxa, al considerar los problemas y susceptibilidad de contaminación de los cuerpos de agua subterráneos.*
- | *Las PTAR operadas por el organismo público presentan problemas de recursos económicos y humanos para lograr el objetivo de tratamiento.*
- | *Las PTAR privadas cuentan con los recursos suficientes para mantener en buenas condiciones sus PTAR y cumplir con la norma de descarga.*
- | *Para todos los casos, en realidad debería aplicar, al menos, la NOM-001-SEMARNAT-1996 para calidad de agua tipo C para la protección de vida acuática, lo cual, no cumple ninguna de las plantas de tratamiento visitadas debido a que los procesos no están integrados para hacerlo.*

Tecnologías
ADECUADAS PARA
LA PENÍNSULA DE
Yucatán



CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS *tecnologías*

La persona o grupo enfrentado ante la selección de una tecnología o sistema de tratamiento de aguas residuales debe considerar aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales, muchas veces en un contexto de mercadotecnia no totalmente veraz. Esto hace que el responsable de la toma de decisiones y su equipo de apoyo deban sopesar varios aspectos como los siguientes:

- | *La planta de tratamiento debe contener equipos a los cuales se les pueda proporcionar mantenimiento en el país o región y que exista disponibilidad de refacciones suficiente con tiempos de entrega aceptables.*
- | *La planta de tratamiento debe ser capaz de resistir períodos sin alimentación sobre todo en pequeñas plantas. Tal situación puede presentarse durante la noche, en la que las descargas de agua residual se ven limitadas para el caso de municipios pequeños y hoteles.*

| *La planta de tratamiento debe contemplar sistemas que minimicen el ruido (casetas acústicas) y la emisión de olores (sistemas de control de olor) pues son aspectos que provocan, en lo inmediato, molestias y reacciones adversas de los vecinos.*

| *En una planta de tratamiento, el agua tratada es el principal producto a obtener, al cual vienen aparejados otros residuos, que, con un correcto manejo, pueden transformarse en subproductos susceptibles de aprovechamiento, tales como los lodos o biosólidos y el biogás en el caso de existir un reactor anaerobio dentro del tren de tratamiento.*

| *La calidad del agua tratada debe ser definida en función de la normativa de descarga que se aplique en el caso particular, o bien, en regiones con escasez de agua, del tipo de reutilización que se le quiera dar. En estos casos, el recurso obtenido, a través del tratamiento que se le ha dado, tiene un valor agregado considerable. El definir con precisión la calidad de agua tratada es un aspecto de primordial importancia para la posterior configuración del tren de proceso de tratamiento.*

| Existe en el mercado del tratamiento de aguas residuales una oferta tecnológica amplia amparada bajo el marco de distintas marcas comerciales. Sin embargo, con frecuencia las diferentes tecnologías dentro de un mismo tipo presentan ligeras variantes, muchas veces solo desde una estrategia meramente comercial. Al conocer el tipo de tecnología y al saber su integración dentro de un tren de tratamiento específico de aguas residuales, es posible dilucidar las eficacias de tratamiento del agua residual y sus requerimientos en cuanto a energía e insumos en general, independientemente de lo que el promotor pueda asegurar en su proceso de venta.

| En este mismo sentido, no solamente es necesario prever los recursos económicos para la operación y el mantenimiento de las plantas de tratamiento sino también la existencia de repuestos o refacciones de los equipos y la disponibilidad de apoyo técnico para dar mantenimiento preventivo o correctivo a sus equipos. Ello, evidentemente, está relacionado y depende del tipo de tecnología y equipamiento que se seleccione.

| En un contexto mexicano y en particular en la Península de Yucatán con limitaciones presupuestales, amplia demanda del servicio y una regulación ambiental que cumplir, la selección de tecnologías de tratamiento y la gestión deben tomar en cuenta también los impactos ambientales generados y no sólo aspectos relacionados con costos de inversión y de operación, incorporando criterios de sustentabilidad y de planeación a largo plazo.

| En este sentido, las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), que constituyen uno de los impactos ambientales relevantes en el tratamiento de aguas, deben tomarse en cuenta en el proceso de toma de decisiones. En términos generales, un sistema de tratamiento de aguas residuales en la medida que genere menor cantidad de GEI necesariamente trae consigo una reducción en los insumos energéticos asociados con su operación (salvo el caso de sistemas que no consuman energía y que indebidamente liberen el metano a la atmósfera o sistemas de tratamiento que consuman energía renovable), aspecto que redundará directamente en la disminución del costo de operación y mantenimiento del sistema.

ACCIONES DEL ESTADO MEXICANO EN RELACIÓN CON LA ESPECIFICACIÓN DE LAS *tecnologías*

| *Al considerar lo anterior, la integración y selección de las tecnologías para el tratamiento del agua residual deben ser orientadas y enfocadas por el Estado Mexicano (en sus tres órdenes de gobierno) bajo criterios eminentemente técnicos debidamente sustentados debido a la enorme diversidad de productos que se ofertan en el mercado, algunos no necesariamente aplicables en el contexto mexicano. Aunado a lo anterior, se debe considerar que, en la mayoría de los casos, las estructuras municipales no poseen un conocimiento técnico profundo para poder discernir lo adecuado, por lo que la selección de las tecnologías de tratamiento de las aguas residuales municipales es un tema que no debe dejarse al libre mercado cuyo interés no necesariamente es compatible con las necesidades de la población.*

En este sentido, se cree necesario que el Estado Mexicano (en sus tres órdenes de gobierno) actúe en las siguientes líneas:

- | *Definir una política pública relativa a favorecer las tecnologías sustentables en el ámbito mexicano y en particular en la Península de Yucatán y alinear las acciones de saneamiento con las de la estrategia nacional ante el Cambio Climático.*
- | *Recomendar el uso de las tecnologías que consideren en el tren de tratamiento sistemas anaerobios como una primera etapa, preferentemente, un reactor anaerobio de lecho de lodos con flujo ascendente (conocido en el ámbito técnico como UASB por sus siglas en inglés) con los equipos necesarios para la captación y el quemado seguro del biogás generado. Este gas podría ser aprovechado para generación de electricidad en instalaciones grandes.*
- | *Recomendar la integración de sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales que, en el tratamiento secundario, inicien con procesos biológicos (anaerobios + aerobios) y que finalicen con sistemas físico-químicos si son requeridos, no al revés.*

- | *Para el caso del uso de lagunas anaerobias, éstas deben ser cubiertas de alguna forma para captar y quemar las emisiones de GEI, de no hacerlo, lo que se hace es transferir la contaminación del agua a la atmósfera. Se deberá legislar al respecto.*
- | *Es necesario legislar para tener normas técnicas que regulen las emisiones de malos olores y la emisión de ruido en las plantas de tratamiento de aguas residuales.*
- | *Legislar para requerir con mayor eficacia a los responsables del manejo del agua en general a conservar la documentación asociada, informar y transparentar las operaciones en el sector.*
- | *Legislar para elevar estratégicamente la educación ambiental a un punto en el cual permee efectivamente en el conocimiento y acervo cultural de la población.*

**RECOMENDACIÓN
DE TECNOLOGÍAS
EN FUNCIÓN
DEL SECTOR
PRODUCTIVO-
COMERCIAL-
MUNICIPAL EN LA
PENÍNSULA DE
Yucatán**

Como se ha expuesto en el capítulo anterior, la generación de aguas residuales preponderante en los tres estados que conforman la península de Yucatán se centra en los siguientes entes: los municipios o localidades en general, la actividad turística, más en concreto, con lo que tiene que ver con hoteles, la actividad pecuaria (producción de cerdos, vacas, aves) y la industria con alta carga biodegradable (alimenticia de todo tipo predominantemente).

La forma para abordar la configuración de trenes de tratamiento que se propone en esta guía es en función de los generadores de aguas residuales y en el destino de las aguas tratadas, es decir, para reúso y/o descarga a cuerpos de agua lo que implica preponderantemente la infiltración al acuífero, dadas las condiciones hidrogeológicas de la península.

Para concebir un tren de tratamiento es necesario tener bien definidas, además de la caracterización del agua cruda, las especificaciones de la calidad de agua tratada que hay que cumplir y que están

definidas en la normatividad vigente. En este sentido se recomienda la lectura del libro Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas (Noyola et al, 2013), en el cual se proporciona una descripción general de las tecnologías existentes, de cómo seleccionarlas y evaluarlas en distintos ámbitos de proyecto. Aunque la guía está orientada en lo fundamental al ámbito municipal, bien puede ser tomada en cuenta también para el industrial. Para el reúso en riego agrícola y de áreas verdes, además de la remoción de los sólidos suspendidos y la materia orgánica, se debe atender la eliminación de microorganismos patógenos o aquellos que puedan causar una afectación a la salud pública. En este caso, la conservación de los nutrientes (nitrógeno y fósforo) es deseable, ya que el reúso aportaría fertilizantes al suelo.

Para un reúso industrial, como agua de enfriamiento o lavados de diverso tipo no alimentario, la remoción de nutrientes es requerida para evitar el crecimiento de algas y biopelículas en los sistemas, como las torres de enfriamiento o cisternas y así reducir el consumo de reactivos comúnmente empleados para su control. Además, se debe cuidar la

concentración de sales, particularmente para evitar incrustaciones en los componentes del sistema de enfriamiento. El reúso en descarga de sanitarios y lavado de pisos o automóviles, debe atender los mismos requisitos, pero con una doble barrera a los organismos patógenos (Noyola, 2016).

Reúsos más estrictos, como lo es la recarga artificial de acuíferos, implican procesos que remuevan en cierto grado materia disuelta como sales inorgánicas y compuestos orgánicos presentes a bajas concentraciones, los llamados compuestos emergentes. El extremo puede considerarse el reúso para abastecimiento directo de agua potable, donde la remoción de orgánicos a nivel de trazas debe ser atendida, además del control de las sales disueltas a niveles equiparables con el agua de primer uso (Noyola, 2016)

El tren de tratamiento biológico tendrá como objetivo básico la remoción de la materia orgánica particulada y soluble (alcance del denominado tratamiento secundario), además de la desinfección para el control de patógenos. La filtración terciaria (del efluente secundario) será necesaria para asegurar la calidad del agua

de reúso en riego, enfriamiento, lavados de pisos y autos. Además, se logra la remoción de huevos de helmintos y se dan las condiciones para una desinfección más confiable y efectiva.

Cuando la calidad del agua para reúso es más estricta que la alcanzada por un tratamiento biológico convencional (secundario) se deben hacer modificaciones al proceso biológico o bien adicionar etapas de tipo fisicoquímico para lograr la calidad deseada. La remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) puede lograrse por vía biológica mediante variantes que involucran una etapa anóxica para la desnitrificación o bien una etapa anaerobia antes de la reacción aerobia, para favorecer en este último punto la acumulación de fósforo en las células microbianas que son recirculadas entre ambas etapas. Por lo general, la remoción de nitrógeno por vía de la nitrificación – desnitrificación constituye un proceso confiable que en algunas de sus variantes alcanza remociones hasta del 90% de nitrógeno. Varias tecnologías han sido desarrolladas para la remoción biológica del nitrógeno, muchas de ellas bajo patente y marcas comerciales, desde la década de los años sesenta del siglo pasado. Entre los más conocidos se encuentra el proceso pionero conocido como “Ludzak & Ettinger” y el Bardenpho, que remueve también fósforo. Los

procesos de remoción de fósforo también son variados y contemplan la remoción de nitrógeno. Un tema muy importante, para cualquier planta de tratamiento de aguas residuales, que en algunos casos puede llegar a limitar la operación de las plantas de tratamiento, es la emisión de olores y ruido. Para ambos casos se debe prever la instalación de sistemas que los mitiguen o en dado caso los eliminen por completo. En el caso de sistemas de tratamiento de olores hay una variada diversidad tecnológica en la que su selección dependerá de las condiciones generales de proyecto. Recomendaciones al respecto se pueden consultar en Morgan-Sagastume, J.M et al., (2001), Revah, S., Morgan-Sagastume, J.M. (2005) y Biblioteca Digital MAPAS, CONAGUA.

En términos generales, al concebir la integración de plantas de tratamiento se deben observar cuatro ámbitos; es decir, el tratamiento del agua, el tratamiento de los lodos, la mitigación de impactos adversos (olores, ruido y emisiones a la atmósfera) y la integración energética de las plantas de tal forma que optimicen el consumo de energía.

Un tema muy importante, para cualquier planta de tratamiento de aguas residuales, que en algunos casos puede llegar a limitar la operación de las plantas de tratamiento, es la emisión de olores y ruido. Para ambos casos se debe prever la instalación de sistemas que los mitiguen o en dado caso los eliminen por completo. En el caso de sistemas de tratamiento de olores hay una variada diversidad tecnológica en la que su selección dependerá de las condiciones generales de proyecto. Recomendaciones al respecto se pueden consultar en Morgan-Sagastume, J.M et al., (2001), Revah, S., Morgan-Sagastume, J.M. (2005) y Biblioteca Digital MAPAS, CONAGUA.

Página web

<https://www.gob.mx/conagua/documentos/biblioteca-digital-de-mapas>.

En términos generales, al concebir la integración de plantas de tratamiento se deben observar cuatro ámbitos; es decir, el tratamiento del agua, el tratamiento de los lodos, la mitigación de impactos adversos (olores, ruido y emisiones a la atmósfera) y la integración energética de las plantas de tal forma que optimicen el consumo de energía.

5 . 3 . 1 /

RECOMENDACIONES PARA EL TRATAMIENTO PRELIMINAR Y PRIMARIO

Un tren de tratamiento de aguas residuales inicia con el tratamiento preliminar y primario enfocado a la remoción de sólidos gruesos y pesados. En la Figura 5.1 se muestra una imagen que da cuenta de un arreglo típico de un tratamiento preliminar para aguas residuales municipales.

En la Figura 5.2 se muestran cuatro procesos integrados que se recomienda utilizar en función de si el generador de las aguas residuales es una localidad municipal, hoteles, industria pecuaria o una industria que genera aguas residuales con alta carga de contaminantes. Todos los trenes deben iniciar con unidades de rejilla gruesa y fina y terminar con equipos para la medición de flujo.

El primer tren de tratamiento contempla, además, un desarenador que es muy importante contemplar para la eliminación de partículas densas y arenas que provienen de los drenajes combinados en las distintas localidades municipales. Algunos hoteles, sobre todo aquellos cercanos a las playas, pueden acarrear arenas en cantidad considerable que deben ser removidas en esta etapa.



FIGURA 5.3 TRATAMIENTO PRELIMINAR CON REJILLAS Y DESARENADORES PARA AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES (FUENTE: IBTECH).

Por otra parte, en el segundo tren propuesto se recomienda utilizar trampas de grasa y tamices finos (Figura 5.3) así como un tanque homogeneizador/ecualización de flujo. Este tren está especialmente recomendado para hoteles que manejen cocinas y comedores los cuales llegan a generar cantidades importantes de grasa que, a toda costa, hay que evitar que ingresen a la planta de tratamiento, independientemente del proceso que contemple. Asimismo, se recomienda un tanque regulador de caudales para mitigar picos hidráulicos durante la operación de la planta. Es muy probable encontrar requerimientos similares en la industria pecuaria y de alta carga (industria láctea, frituras, rastros, por ejemplo).

TRATAMIENTO PRELIMINAR
y primario

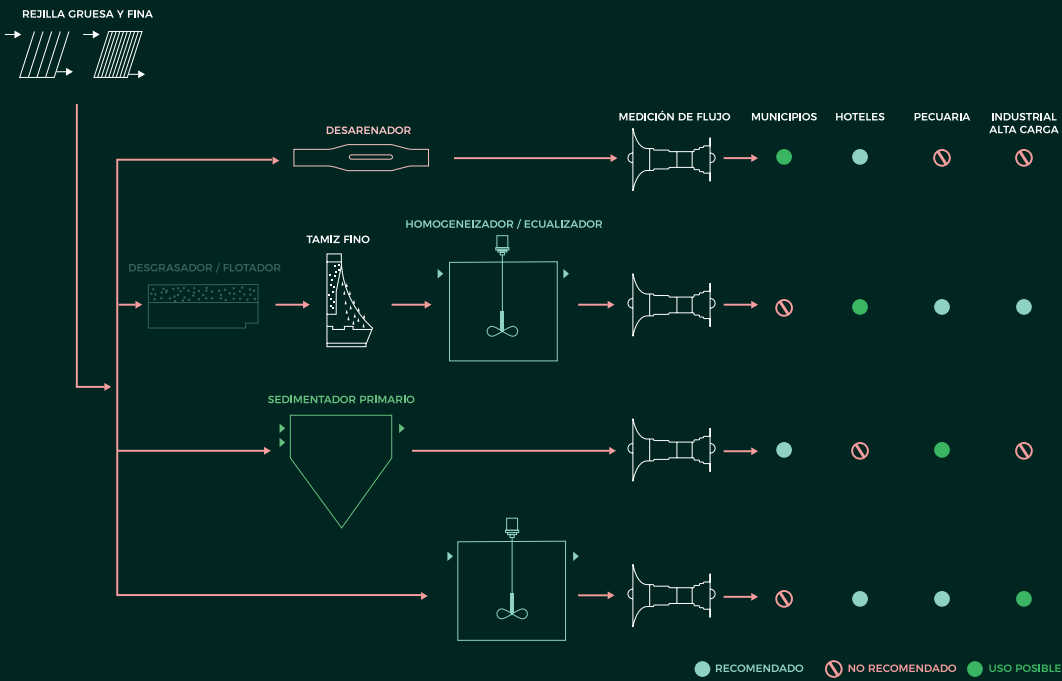


FIGURA 5.2 ESQUEMA DE TRATAMIENTOS PRELIMINAR Y PRIMARIO RECOMENDADO EN FUNCIÓN DEL ENTE GENERADOR DE AGUAS RESIDUALES.



FIGURA 5.3 TAMICES FINOS UTILIZADOS EN UNA INDUSTRIA MALTERA (FUENTE:IBTECH)

El sedimentador primario puesto en el tercer tren se especifica para aquellas aguas residuales que contengan altos contenidos de sólidos suspendidos; caso ejemplar son las aguas residuales provenientes de la industria de ganado vacuno y porcino. Es posible su uso en algunos trenes de tratamiento configurados para el tratamiento de aguas residuales municipales, sin embargo, muchas tecnologías, por su capacidad de tratamiento, pueden prescindir de este equipo.

Por último se recomienda un tren de tratamiento integrado con un homogeneizador/ecualizador de flujo para plantas de tratamiento que traten aguas residuales para la industria. Este tanque, como su nombre lo indica, permite la homogeneización del agua en cuanto a carga orgánica, pH y nutrientes; así mismo permite la regulación del flujo de tal forma que el tanque incremente o disminuya el volumen del agua contenida pero que asegure un caudal relativamente uniforme a la planta de tratamiento.

5 . 3 . 2 /

RECOMENDACIÓN DE TRENES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA CUMPLIR CON LA NOM-001-SEMARNAT-1996 PARA DESCARGAS TIPOS A Y B Y LA NOM-003-SEMARNAT-1997 CON CALIDAD PARA CONTACTO DIRECTO

En la Figura 5.4 se muestran los esquemas para tratamiento secundario recomendados para cumplir con estas dos normas al considerar descargas tipo A y B y para reúso de agua tratada con calidad para contacto directo. Así mismo se recomienda un tren secundario en función del ente generador del agua residual; es decir, localidades municipales, hoteles, industria pecuaria e industria con aguas residuales concentradas en materia orgánica (alta carga). Es preciso comentar que se trata de tecnologías en general y que no están bajo el amparo de ninguna marca comercial; los nombres de las tecnologías a las que se hace referencia son genéricos y de amplio uso en el medio académico y aún comercial. Además, en la segunda parte de la Figura 5.4 se presentan los esquemas de tratamiento secundario pero usando como tratamiento inicial el reactor anaerobio tipo UASB.

TRATAMIENTO SECUNDARIO

SECUNDARIO

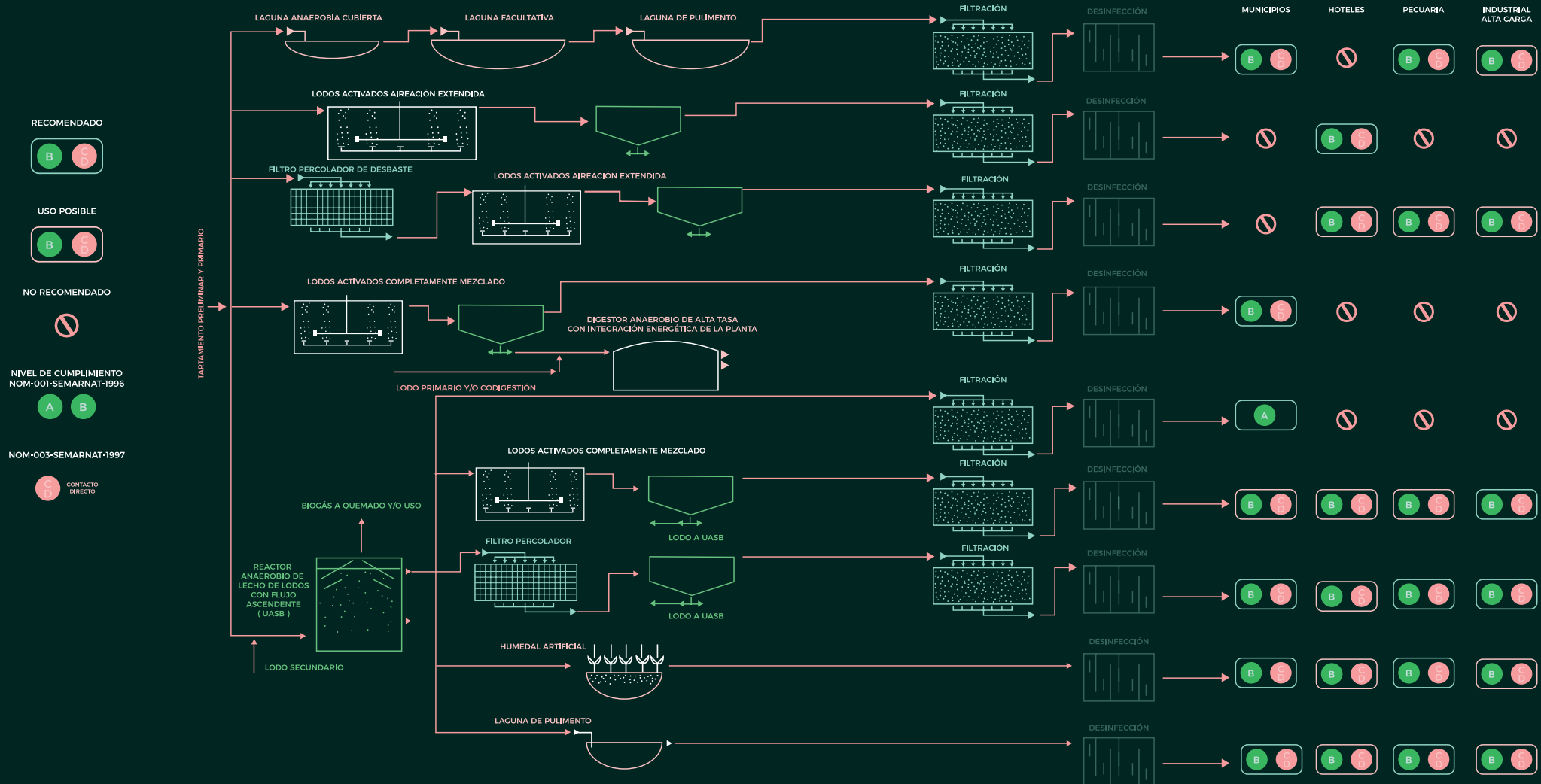


FIGURA 5.4 ESQUEMA DE TRATAMIENTOS SECUNDARIOS RECOMENDADOS EN FUNCIÓN DEL ENTE GENERADOR DE AGUAS RESIDUALES PARA CUMPLIR CON LAS NOM-001-SEMARNAT-1996 DESCARGAS TIPO A Y B Y CON LA NOM-003-SEMARNAT-1997 CON CALIDAD DE AGUA TRATADA PARA REÚSO CON CONTACTO DIRECTO

Municipios

En el caso de las aguas residuales municipales, como es posible observar en la figura 5.4, se pueden encontrar varias opciones para efectuar el tratamiento. La selección del tren de tratamiento dependerá de las condiciones multifactoriales propias del proyecto (como destino del agua tratada, área disponible, recursos económicos suficientes para la operación y mantenimiento, capacitación de operadores, refacciones, etc.). La calidad del agua tratada es similar en todos los casos excepto para el tren conformado por el reactor UASB seguido únicamente de una filtración con arena-antracita que produce agua con calidad tipo A. Los sistemas que contemplan lodos activados en su variante aireación extendida no se recomiendan para el ámbito municipal, considerando las limitaciones financieras y técnicas que enfrentan la mayoría de los organismos operadores, debido a sus altos requerimientos energéticos y económicos para sostener su operación y mantenimiento comparado con las otras opciones que proporcionan similar calidad de agua tratada. Es de señalar que en el país existen muchas plantas de tratamiento de este tipo por ser ampliamente conocidas en el ámbito ingenieril y por la eficacia en el tratamiento del agua además de minimizar la producción de lodo. Sin embargo, todo ello es a costo de un consumo energético alto, de hecho de los más altos que hay en sistemas de tratamiento de aguas residuales. Para aquellos municipios que no puedan asegurar la suficiencia



FIGURA 5.5 SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS EN SU VARIANTE AIREACIÓN EXTENDIDA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES (FUENTE: II-UNAM)



FIGURA 5.6 FILTROS PERCOLADORES DE BAJA TASA PUESTOS EN SERIE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES (FUENTE: IBTECH)

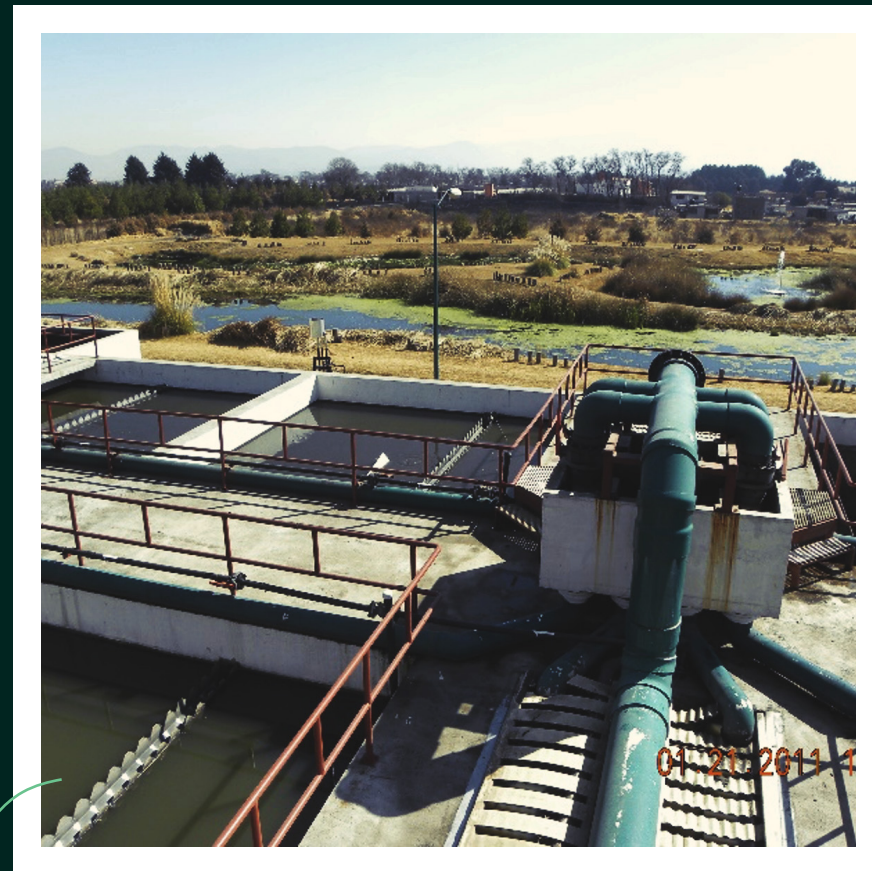


FIGURA 5.7 REACTOR UASB SEGUIDO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES (FUENTE: IBTECH)

económica para su operación y mantenimiento (algo muy común en la Península de Yucatán y en el País en general) no es adecuada su utilización. Como es posible observar, ésta tecnología puede ser reemplazada por otras más sustentables.

Para el caso de altos caudales (mayores a 350 l/s) es muy recomendable considerar el esquema lodo activado en su variante completamente mezclado con tratamiento anaerobio de los lodos de purga para maximizar la producción de biogás y la generación de energía eléctrica y térmica para autoconsumo en la planta de tratamiento. Con ello se estiman ahorros del 65-70% en cuanto al consumo energético. Como se comentó, se recalca que este esquema de tratamiento se aplica para caudales altos; para medianos y pequeños flujos no es recomendable por la alta relación costo-beneficio que ello implica.

En el caso de seleccionar los sistemas lagunares se hace énfasis en la necesidad y requerimiento ambiental de captar el biogás en la laguna anaerobia para su quemado. No se debe ventear el biogás pues se libera metano (potente gas de efecto invernadero) a la atmósfera.

Hoteles

Se recomienda ampliamente el uso del sistema de lodos activados en su variante aireación extendida, ello derivado a que se reduce sustancialmente la producción de lodo, además de que este se extrae estabilizado. Por otra parte se asegura la calidad del agua tratada con unidades relativamente compactas (bajo requerimiento de área). Sin embargo, este sistema requiere de mayor recurso económico para su operación y mantenimiento; en este sentido, se asume que los hoteles, sobre todo aquellos de alta gama, pueden sufragar sin problema este requerimiento.

Es también factible considerar el uso de trenes de tratamiento en donde se utilice el reactor UASB. Sin embargo, este sistema es susceptible a generar malos olores además de que se debe quemar el biogás generado por lo que, en un ambiente propio de un hotel, se puede complicar su manejo a menos de que exista la posibilidad de ubicar la planta de tratamiento lejos de las instalaciones turísticas del hotel (mayor a 100 m). Lo mismo aplica para el caso del uso del filtro percolador de desbaste, lagunas o humedales artificiales que pueden ser atractores de vectores (moscas, mosquitos).



FIGURA 5.8 SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS
(FUENTE: II-UNAM)

Industria pecuaria

Las aguas residuales de este sector industrial genera aguas residuales con alta concentración de materia orgánica situación que hace imperativo el uso de sistemas anaerobios en el tren de tratamiento, ya sea usar lagunas anaerobias cubiertas (digestores anaerobios cubiertos de baja tasa) (Figura 5.9) o el reactor anaerobio tipo UASB. Se recomienda como postratamiento del efluente anaerobio sistemas que no estén altamente mecanizados (aunque cabe la posibilidad de usarlos) por el alto costo operativo que implica; a cambio se sugieren opciones con sistemas extensivos (lagunas, humedales) o con el filtro percolador cuya aireación se lleve a cabo por convección natural.

Se hace énfasis que, de escoger sistemas lagunares como tren de tratamiento, la laguna anaerobia debe estar cubierta para captar el biogás y quemarlo o eventualmente aprovecharlo, además de que es imperativo que cuenten con sistemas de mezclado (intermitente) y purga de lodos para evitar su azolvamiento.



FIGURA 5.9 VISTA DE UN DIGESTOR TIPO LAGUNA CUBIERTA PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTE PORCÍCOLA (FUENTE: II-UNAM)

Industria con efluentes con alta carga orgánica

La recomendación para este caso es la misma que opera para la industria pecuaria a excepción de que, en este caso, por falta generalizada de área en las instalaciones industriales, se deberán favorecer los postratamientos del efluente anaerobio con sistemas compactos mecanizados (lodos activados).

La recomendación general se basa en el uso del reactor UASB, sin embargo, existen otras tecnologías anaerobias de alta tasa y más compactas, como el reactor anaerobio de lecho expandido (ECSB por sus siglas en inglés) que pudiera aplicarse con éxito. (Noyola, A., et al, 2013).

5 . 3 . 3 /

RECOMENDACIÓN DE TRENES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA CUMPLIR CON LA NOM-001-SEMARNAT-1996 PARA DESCARGAS TIPO C Y EL PROYECTO DE NOM-001-SEMARNAT-2021

Para poder cumplir con esta norma de descarga a cuerpos de agua tipo C y protección de vida acuática, así como para su proyecto de modificación, es necesario, además de remover materia orgánica, la remoción de nutrientes; nitrógeno y fósforo. La descarga para calidad de agua tipo C es más estricta en estos parámetros que lo que propone el proyecto de modificación de la norma; solo que para este último caso, ya no se hace distinción si el cuerpo de agua es A, B o C, se pediría la remoción de nutrientes para cualquier caso.

Como es posible observar en la Figura 5.10 donde se proponen trenes de tratamiento para la remoción tanto de materia orgánica como de nutrientes principalmente, las plantas de tratamiento de aguas residuales se tornan mas complejas y ello demanda mayor inversión y atención para su operación y mantenimiento.

Para el caso particular de la península de Yucatán, debido al suelo de tipo cárstico sumamente permeable, la descarga de agua tratada a suelo o a cauces superficiales en los hechos en realidad, es una recarga artificial de acuíferos. Debido a ello, desde el punto de vista técnico, no basta con

cumplir la NOM-001-SEMARNAT-1996 (tipo C), sino que, en un extremo, habría que cumplir con la NOM-014-CONAGUA-2003 que en su texto hace referencia a la norma que regula la calidad potable del agua (NOM-127-SSA1-1994). La Comisión Nacional del Agua es la encargada de definir las condiciones particulares de descarga para este caso en particular (descarga a suelos cársticos) las cuales estarán entre lo estipulado por la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la más estricta norma NOM-014-CONAGUA-2003.

El proyecto de NOM-001-SEMARNAT-2021, que está en su última fase para su publicación (a octubre del 2021), propone regular la calidad del agua a ser descargada en suelos cársticos.

Se reconoce en el proyecto de norma que “los ecosistemas cársticos tienen un elevado valor de uso por su contribución en el abastecimiento de agua, por sus formaciones naturales características que los hacen atractivos para la actividad turística proveyendo empleo e ingresos para la población local y por constituir un hábitat de flora y fauna endémicas. Sin embargo, la característica permeable y de rápida filtración de sus rocas hace que este ecosistema sea muy vulnerable a la contaminación proveniente de las descargas de aguas residuales y a la contaminación directa de los acuíferos”.

En este sentido, resultan relevantes los límites máximos permisibles en cuanto a promedio mensual referido a los parámetros de DQO (60 mg/l), SST (20 mg/l), Nitrógeno total (15 mg/l), Fósforo total (5 mg/l) y de huevos de helminto (1 mg/l). Ello implicará la reconversión de las plantas de tratamiento de aguas residuales en un lapso máximo de un año a partir de la publicación de la norma.

TRATAMIENTO SECUNDARIO Y TERCIARIO
con tecnologías recomendadas

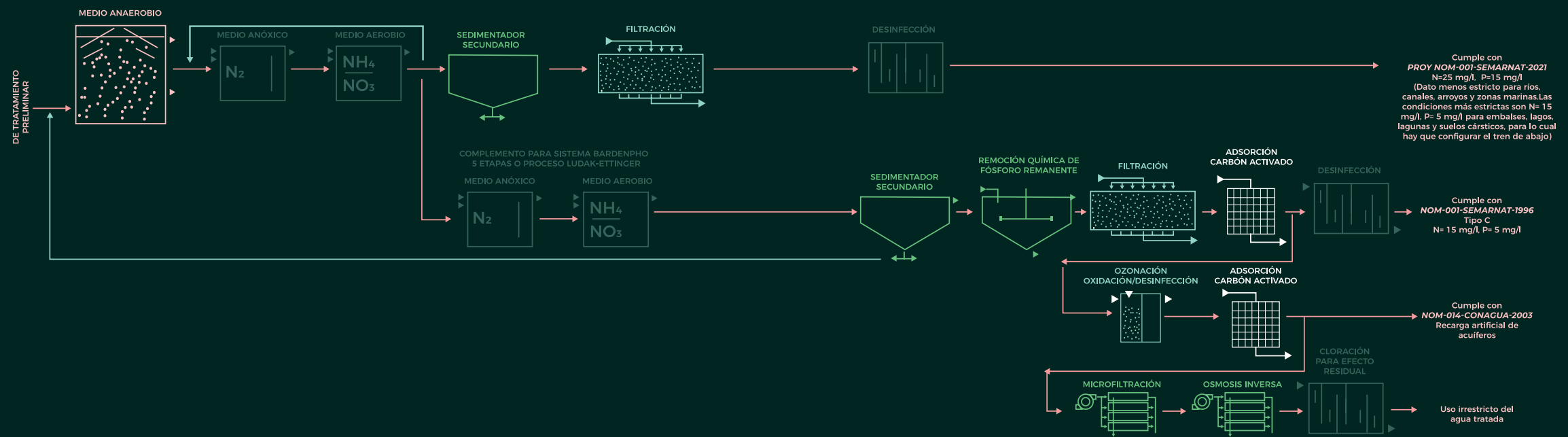


FIGURA 5.10 ESQUEMAS POSIBLES PARA DAR CUMPLIMIENTO A LA NOM-001-SEMARNAT-1996 CON DESCARGAS A CUERPOS DE AGUA TIPO C, AL PROYECTO DE NOM-001-SEMARNAT-2021 Y A LA NOM-014-CONAGUA-2003 PARA LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS.

Evidentemente, esto resulta en un reto tecnológico importante que demandaría cuantiosos recursos económicos, capacitación de operadores, desarrollar una cadena productiva y de servicios alrededor de las plantas de tratamiento y una gestión que asegure su sostenibilidad. Para las condiciones económico-sociales que privan actualmente en la Península de Yucatán y en el país en general resulta ser, a priori, inalcanzable.

5 . 3 . 4 /

RECOMENDACIÓN DE TRENES DE TRATAMIENTO PARA CASA HABITACIÓN Y/O ENTES GENERADORES DE AGUAS RESIDUALES CON FLUJOS MUY PEQUEÑOS

Por la naturaleza cárstica del suelo en la península de Yucatán, no se ha adoptado en forma generalizada la construcción de drenajes para la conducción de las aguas residuales de zonas urbanas a un sitio para su tratamiento y disposición final.

Para dar solución al tratamiento de las aguas residuales generadas en casa habitación o entes que generen aguas residuales tipo doméstica con pequeños flujos y que no estén conectados al drenaje, se debe plantear un tratamiento descentralizado mediante sistemas de tratamiento de bajo costo de inversión y sobre todo para su operación y mantenimiento.

Uno de los trenes de tratamiento que cumplen con lo anterior es la combinación de un sistema anaerobio tipo fosa séptica o un digestor anaerobio de baja tasa combinado con un humedal artificial con filtración y desinfección para cada casa habitación (si es que hay área para su instalación) o para entes generadores de aguas residuales de tipo doméstica (descargas de sanitarios y aguas grises) con bajo flujo que pudieran ser, por ejemplo, pequeñas escuelas y

clínicas. Así mismo se puede pensar los sanitarios de las plazas de cobro de las autopistas, pequeños restaurantes, pequeños hoteles y unidades habitacionales.

En algunos países se ha probado con éxito el concepto de planta de tratamiento comunitaria donde la base del tratamiento es un digestor anaerobio de baja tasa seguido de un sistema natural construido para el tratamiento del efluente anaerobio. Este tipo de sistema se aplica para comunidades aisladas y de alta marginación, en donde las casas habitación se encuentran distantes unas de otras y en donde la instalación de un drenaje resultaría muy costoso, así como una planta de tratamiento para cada casa habitación. Para este caso los desechos orgánicos familiares de todo tipo; es decir, heces fecales, orina, desechos alimenticios e inclusive estiércoles y desechos derivados de la cría de animales de traspatio es transportado manualmente por cada habitante de la casa al digestor anaerobio comunitario.

Del digestor es posible la obtención de energía a través de la combustión del biogás (que cada habitante puede recolectar con bolsas impermeables que se inflan con el biogás en el sitio), lodo estabilizado del digestor que puede ser usado como fertilizante natural y, por supuesto, agua tratada para riego de cultivos.



FIGURA 5.11 SISTEMA DE TRATAMIENTO CON BASE EN UNA FOSA SÉPTICA ACOPLADA A UN FILTRO ANAEROBIO Y UN POSTRATAMIENTO CON HUMEDAL ARTIFICIAL PARA UNA CASA HABITACIÓN. EL AGUA TRATADA CUMPLE PARA RIEGO DEL JARDÍN (FUENTE: IBTECH).



FIGURA 5.12 CASA DE CAMPO CON SISTEMA DE TRATAMIENTO INDIVIDUAL; FOSA SÉPTICA SEGUIDO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL (FUENTE: II-UNAM).

Estas experiencias exitosas provienen del sudeste asiático; su adopción en el medio mexicano requeriría un estudio socio-económico formal basado en amplias consultas a la comunidad.

Otra opción puede ser el drenaje de tipo condominal en el que se construye un drenaje de baja profundidad y pendiente, con diámetro de 4 pulgadas en la mayor parte de sus líneas. Esta red no convencional recibe el agua proveniente de fosas sépticas domiciliarias y la transporta a una instalación comunitaria, que puede ser un proceso anaerobio o un humedal.

Lo que se pretende a través del concepto del saneamiento descentralizado es ofrecer una opción frente a las formas convencionales de saneamiento (lo centralizado), para mejorar las condiciones de vida de la población que vive sin estos servicios o se encuentra dispersa y por lo tanto se hace inviable la construcción de un drenaje. Por su naturaleza exige un enfoque social holístico más que un concepto meramente técnico e involucra un intenso trabajo social. Asimismo, permite establecer un contacto más estrecho y una participación más directa de la población beneficiaria. Esta participación comprende desde la planificación, implementación y gestión del tratamiento de aguas residuales y reúso de aguas tratadas, hasta el impulso de la apropiación y autogestión de ambos servicios.

ANÁLISIS DEL
COSTO DE LAS
TECNOLOGÍAS
RECOMENDADAS
PARA LA PENÍNSULA
de Yucatán

Se realizó el costeo para cada una de las operaciones unitarias que integran los trenes de tratamiento recomendados, y así obtener la inversión total de cada tren de tratamiento propuesto. Los trenes de tratamiento se componen de sub trenes de tratamiento, como son: pretratamiento y tratamiento primario, tratamiento secundario con reactor anaerobio, tratamiento secundario sin reactor anaerobio y tratamiento terciario. En la Tabla 5.1 se muestran los sub trenes de tratamiento con claves para un fácil manejo de la información.

PRETRATAMIENTO Y
TRATAMIENTO PRIMARIO

SUB TREN DE TRATAMIENTO

1A

CLAVE

REJILLAS GRUESA/FINA +
DESARENADOR +MEDICIÓN DE FLUJO
OPERACIONES UNITARIAS

1B

CLAVE

REJILLAS GRUESA/FINA +
DESGRASADOR/FLOTADOR +
TAMIZ FINO + HOMOGENEIZADOR/
ECUALIZADOR + MEDICIÓN
DE FLUJO
OPERACIONES UNITARIAS

1C

CLAVE

REJILLAS GRUESA/FINA +
SEDIMENTADOR PRIMARIO +
MEDICIÓN DE FLUJO
OPERACIONES UNITARIAS

1D

CLAVE

REJILLAS GRUESA/FINA +
HOMOGENEIZADOR/ECUALIZADOR +
MEDICIÓN DE FLUJO
OPERACIONES UNITARIAS

TRATAMIENTO SECUNDARIO CON R. ANAEROBIO UASB

SUB TREN DE
TRATAMIENTO

2AA

CLAVE

UASB + FILTRACIÓN + DESINFECCIÓN
OPERACIONES UNITARIAS

2AB

CLAVE

**UASB + LODOS ACTIVADOS
(COMPLETAMENTE MEZCLADO) +
SEDIMENTADOR SECUNDARIO +
FILTRACIÓN + DESINFECCIÓN**
OPERACIONES UNITARIAS

2AC

CLAVE

**UASB + FILTRO PERCOLADOR +
SEDIMENTADOR SECUNDARIO +
FILTRACIÓN + DESINFECCIÓN**
OPERACIONES UNITARIAS

2AD

CLAVE

**UASB + HUMEDAL ARTIFICIAL +
DESINFECCIÓN**
OPERACIONES UNITARIAS

2AE

CLAVE

**UASB + LAGUNA DE PULIMENTO +
DESINFECCIÓN**
OPERACIONES UNITARIAS

TRATAMIENTO SECUNDARIO SIN R. ANAEROBIO

SUB TREN DE
TRATAMIENTO

2BA

CLAVE

**LAGUNA ANAEROBIA CUBIERTA + LAGUNA
FACULTATIVA + LAGUNA DE PULIMENTO +
FILTRACIÓN + DESINFECCIÓN**
OPERACIONES UNITARIAS

2BB

CLAVE

**LODOS ACTIVADOS (AEREACIÓN EXTENDIDA)
+ SEDIMENTADOR SECUNDARIO + FILTRACIÓN
+ DESINFECCIÓN**
OPERACIONES UNITARIAS

2BC

CLAVE

**FILTRO PERCOLADOR + LODOS ACTIVADOS
(AEREACIÓN EXTENDIDA) + SEDIMENTADOR
SECUNDARIO + FILTRACIÓN +DESINFECCIÓN**
OPERACIONES UNITARIAS

2BD

CLAVE

**LODOS ACTIVADOS (COMPLETAMENTE
MEZCLADO) + SEDIMENTADOR SECUNDARIO
+ FILTRACIÓN + DESINFECCIÓN + DIGESTOR
ANAEROBIO**
OPERACIONES UNITARIAS

TRATAMIENTO AVANZADO

SUB TREN DE TRATAMIENTO

3A

CLAVE

MEDIO ANAEROBIO + MEDIO ANÓXICO - MEDIO AEROBIO + SEDIMENTADOR SECUNDARIO + FILTRACIÓN + DESINFECCIÓN

OPERACIONES UNITARIAS

3B

CLAVE

M. ANAEROBIO + M. ANÓXICO - M. AEROBIO + M. ANÓXICO - M. AEROBIO + SEDIMENTADOR SECUNDARIO + REMOCIÓN QUÍMICA DE FÓSFORO + FILTRACIÓN + ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO + DESINFECCIÓN

OPERACIONES UNITARIAS

3C

CLAVE

M. ANAEROBIO + M. ANÓXICO - M. AEROBIO + M. ANÓXICO - M. AEROBIO + SEDIMENTADOR SECUNDARIO + REMOCIÓN QUÍMICA DE FÓSFORO + FILTRACIÓN + OZONACIÓN + ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO

OPERACIONES UNITARIAS

3D

CLAVE

M. ANAEROBIO + M. ANÓXICO - M. AEROBIO + M. ANÓXICO - M. AEROBIO + SEDIMENTADOR SECUNDARIO + REMOCIÓN QUÍMICA DE FÓSFORO + FILTRACIÓN + OZONACIÓN + ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO + MICROFILTRACIÓN + ÓSMOSIS INVERSA + CLORACIÓN

Para el costeo se empleó el simulador de procesos desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM e IBTech para el proyecto “LAC cities adapting to climate change by making better use of their available bioenergy Resources”, auspiciado por el International Development Research Center (IDRC-2013) de Canadá y el simulador de procesos desarrollado por IBTech (Biogas Tool) auspiciado por la Agencia Danesa de Energía (2019). Asimismo, se emplearon cotizaciones de equipo, hojas de cálculo y bases de datos propiedad de la empresa IBTech (ELNSYST SA de CV, www.ibtech.com.mx).

La estimación de costos se realizó por orden de magnitud, por lo que éste sirve únicamente para tener una referencia de los costos y una comparación económica de las tecnologías propuestas.

El costeo por operación unitaria que incluye cada tren de tratamiento considera la obra civil y el equipo electromecánico. El costo de tuberías, obra eléctrica e instrumentación se estimó como un porcentaje del costo del equipo/tanque de acuerdo con el proceso, considerando la cantidad de tuberías y mecanización del

tren de tratamiento. Finalmente, después de la integración completa de los trenes de tratamiento, al costo de construcción estimado se le aplicó un porcentaje del 30% correspondiente a costos administrativos y de ingeniería. Además, el costeo de lagunas y humedales incluye la excavación, geomembranas y compactación.

Por otro lado, los costeos realizados corresponden a flujos de 5, 15, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300 y 400 l/s y una caracterización de carga municipal media-alta, con una DQOt de 800 mg/L, DBOt de 400 mg/L, SST de 250 mg/L y 200 mg/L de SSV. De acuerdo con lo anterior, la caracterización empleada aplica para efluentes municipales y aquellos provenientes de hoteles. Sin embargo, dicha caracterización resulta muy diluida para efluentes de la industria pecuaria y de industrias de alta carga, razón por la cual no se efectuó el análisis de costo para estas opciones. El costeo de estas unidades estaría en función de dos variables; es decir, el flujo y concentración lo cual daría una amplia combinación de trenes de tratamiento que esta fuera de los alcances de esta guía.

Por otro lado, los sub trenes de tratamiento

presentados corresponden a opciones recomendadas, opciones con posible uso y opciones no recomendadas (tal como se puede observar en las Figuras 5.2, 5.4 y 5.5). De manera que, debido a la gran cantidad de combinaciones que supone la integración de los sub trenes de pretratamiento, solo se muestran las opciones recomendadas y las opciones con uso posible para el tratamiento secundario. Respecto al pretratamiento, siempre se consideró el tren recomendado.

En el ANEXO se presentan los costos de inversión y operación más desglosados para su consulta. Para una mejor identificación en los gráficos, se empleó una R o una P, donde la primera corresponde al tratamiento secundario recomendado, mientras que la segunda al tratamiento de uso posible.

De manera que, en la Figura 5.13 se presentan los costos estimados de inversión de los trenes de tratamiento recomendados para efluentes municipales para caudales entre 5 y 50 L/s, mientras que la Figura 5.14 para caudales entre 75 y 400 L/s.

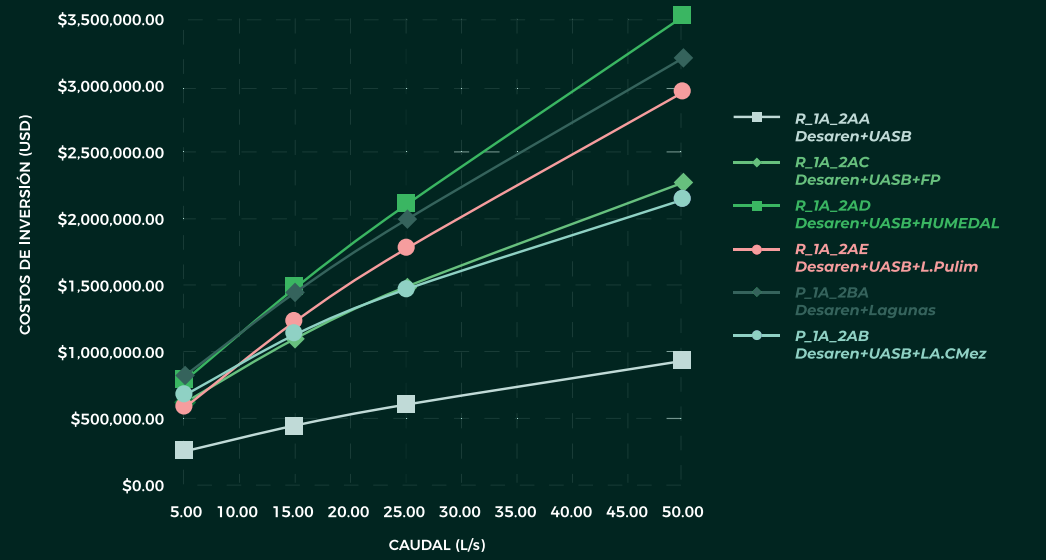


FIGURA 5.13 COSTOS ESTIMADOS DE INVERSIÓN (USD) DE TRENES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES RECOMENDADOS PARA EFLUENTES MUNICIPALES. FLUJOS DE 5 A 50 L/S.

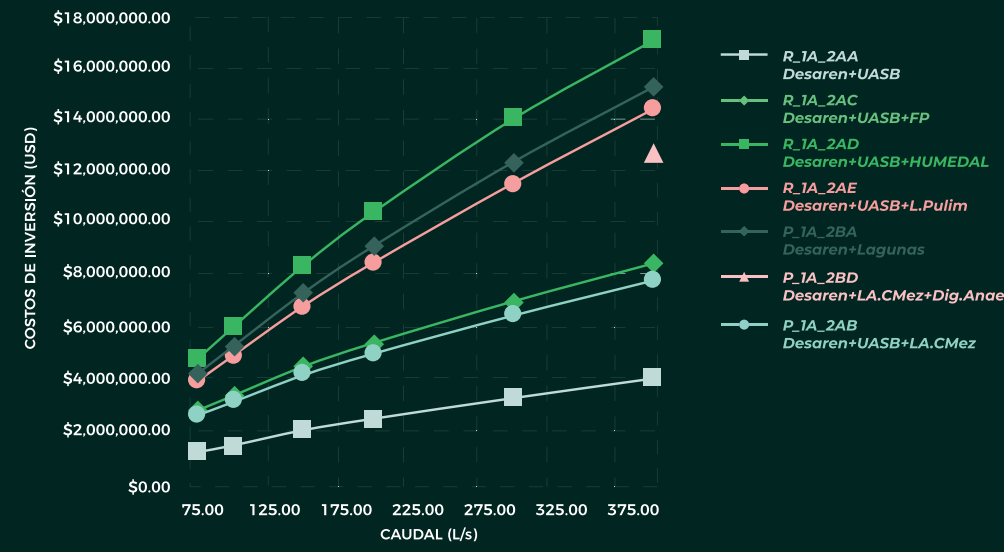


FIGURA 5.14 COSTOS ESTIMADOS DE INVERSIÓN (USD) DE TRENES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES RECOMENDADOS PARA EFLUENTES MUNICIPALES. FLUJOS DE 75 A 400 L/S.

Por otro lado, las Figuras 5.15 y 5.16 muestran los costos estimados de operación de los trenes de tratamiento recomendados para afluentes municipales para caudales entre 5 y 50 L/s, y entre 75 y 400 L/s, respectivamente.

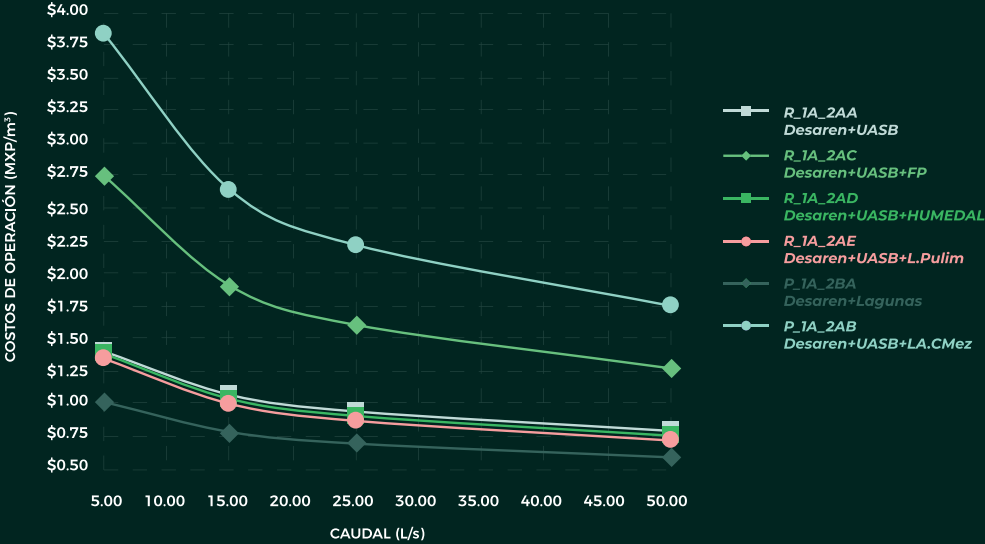


FIGURA 5.15 COSTOS ESTIMADOS DE OPERACIÓN (PESOS MEXICANOS) DE TRENES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES RECOMENDADOS PARA EFLUENTES MUNICIPALES. FLUJOS DE 5 A 50 L/S.

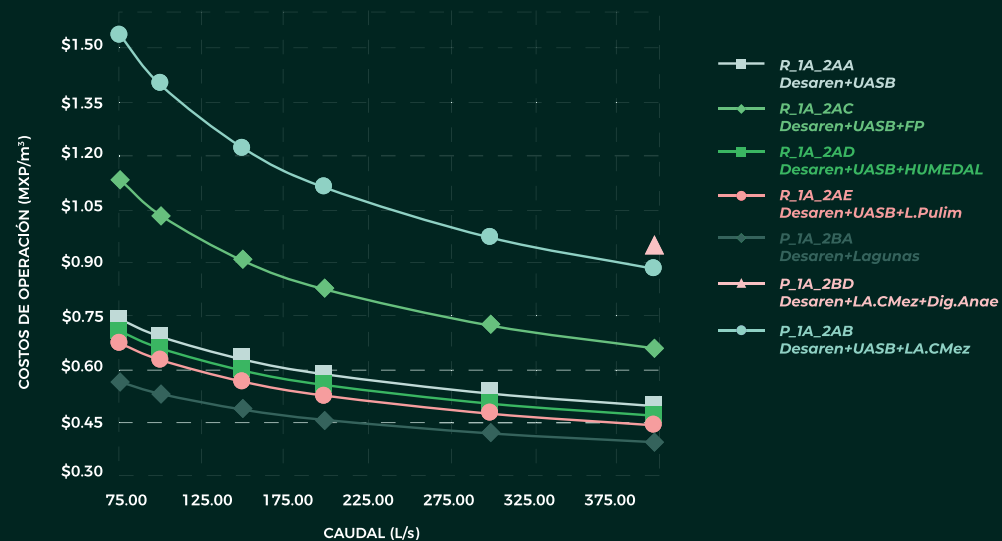


FIGURA 5.16 COSTOS ESTIMADOS DE OPERACIÓN (PESOS MEXICANOS) DE TRENES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES RECOMENDADOS PARA EFLUENTES MUNICIPALES. FLUJOS DE 75 Y 400 L/S

Por otra parte, las Figuras 5.17 y 5.18 presentan los costos estimados de inversión de los trenes de tratamiento recomendados para descargas provenientes de hoteles para caudales entre 5 y 50 L/s, y 75 y 400 L/s, respectivamente. Cabe señalar que muy difícilmente , en el ámbito de la industria hotelera, se tendrían flujos tan altos que pudieran superar los 50 l/s, sin embargo, se presenta la gráfica 5.18 para que, eventualmente, se considere la información presentada en ella para la evaluación de trenes en otro tipo de efluentes que tengan unidades desengrasantes.

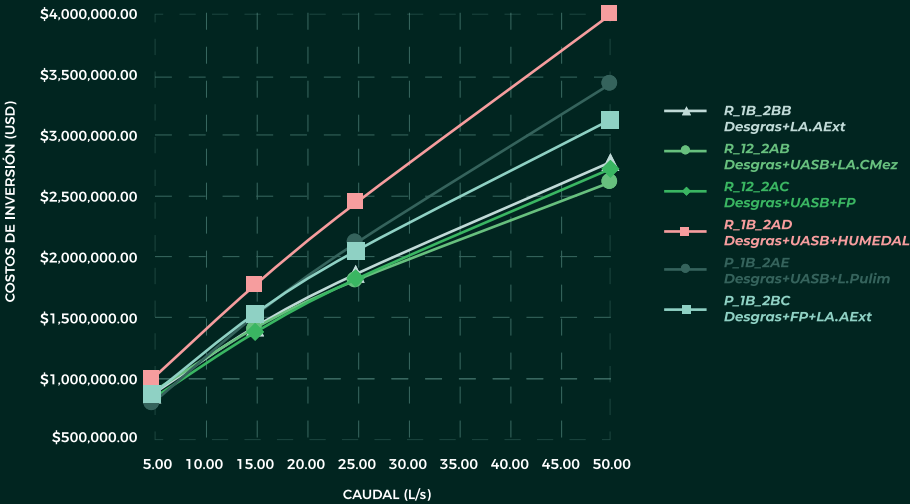


FIGURA 5.17 COSTOS ESTIMADOS DE INVERSIÓN (USD) DE TRENES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES RECOMENDADOS PARA EFLUENTES DE HOTELES. FLUJOS DE 5 A 50 L/S.

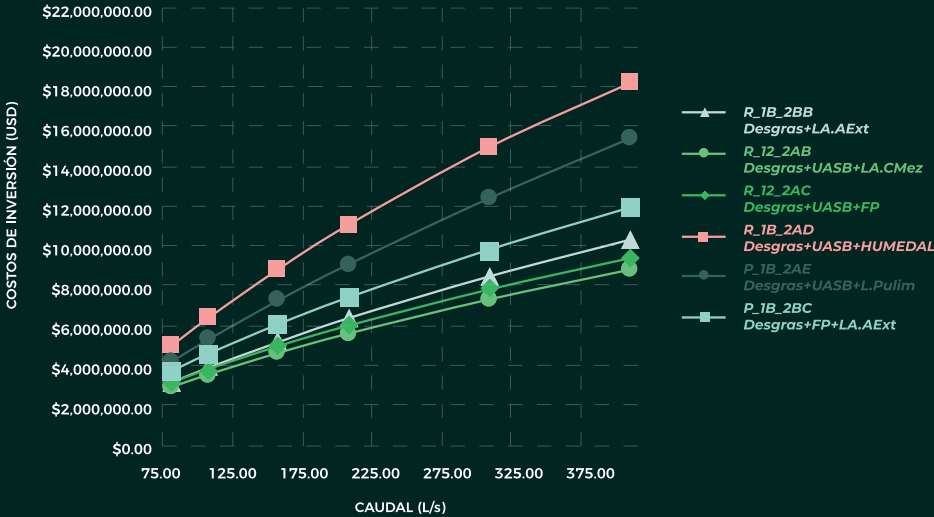


FIGURA 5.18 COSTOS ESTIMADOS DE INVERSIÓN (USD) DE TRENES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES RECOMENDADOS PARA EFLUENTES DE HOTELES. FLUJOS DE 75 A 400 L/S.

Finalmente, las Figuras 5.19 y 5.20 exhiben los costos estimados de operación de los trenes de tratamiento recomendados para afluentes provenientes de hoteles para caudales entre 5 y 50 L/s, y 75 y 400 L/s, respectivamente.

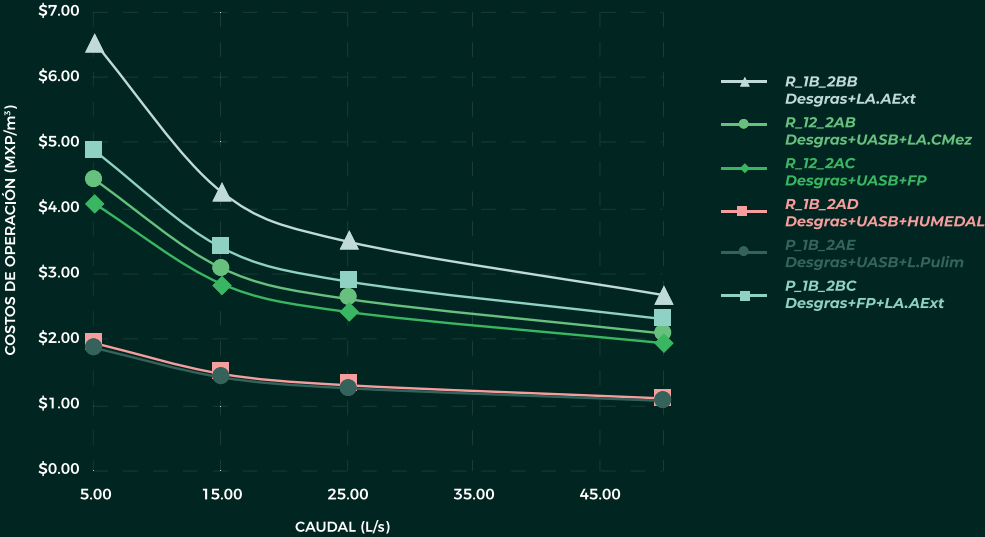


FIGURA 5.19 COSTOS ESTIMADOS DE OPERACIÓN (PESOS MEXICANOS) DE TRENES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES RECOMENDADOS PARA EFLUENTES DE HOTELES. FLUJOS DE 5 A 50 L/S.

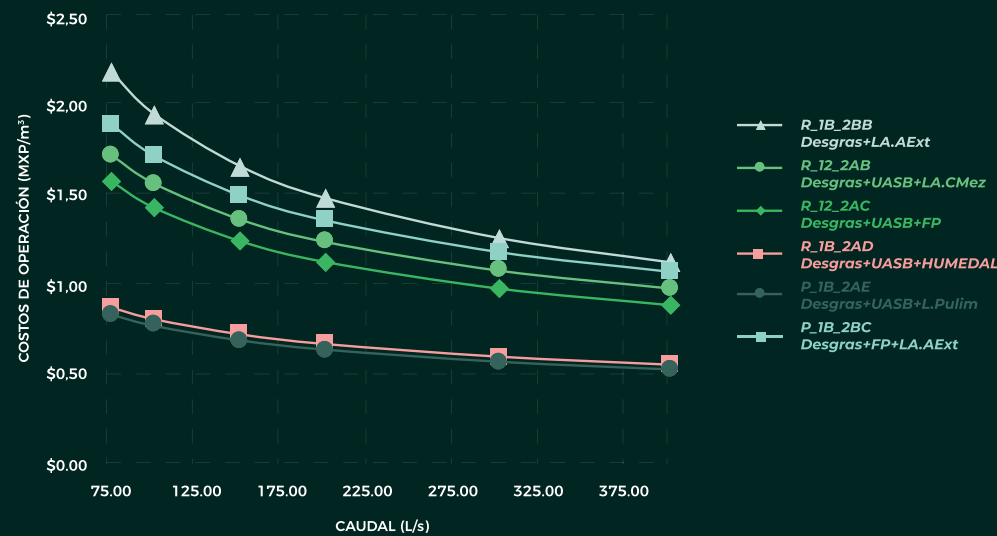


FIGURA 5.19 COSTOS ESTIMADOS DE OPERACIÓN (PESOS MEXICANOS) DE TRENES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES RECOMENDADOS PARA EFLUENTES DE HOTELES. FLUJOS DE 75 A 400 L/S.

De los gráficos anteriores, se puede observar que, para caudales pequeños, las diferencias entre los costos de inversión de un sistema lagunar o un sistema de lodos activados son pequeñas.

Los costos de inversión para los sistemas lagunares y humedales se incrementan de manera significativa en función del flujo ello debido al costo de excavación, impermeabilización y relleno en el caso de los humedales. Además, para estos casos, es importante considerar el costo del terreno (no incluido en el costeo).

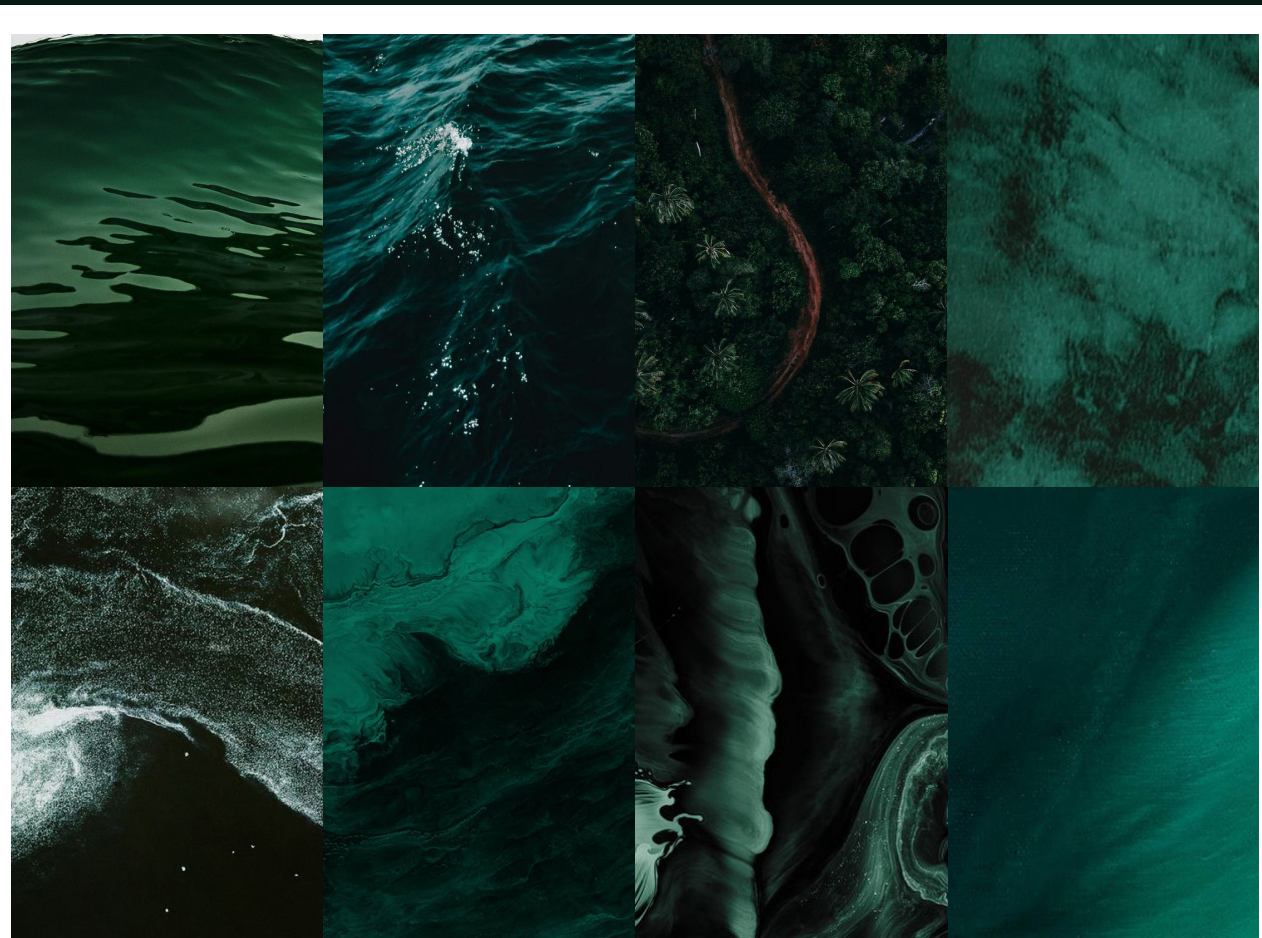
Por otro lado, los costos de operación para los sistemas poco mecanizados como los sistemas naturales son muy bajos en comparación con los sistemas de lodos activados. En ambos casos, los costos de operación disminuyen con el incremento del caudal por economía de escala; sin embargo, la mayor disminución se aprecia en los sistemas mecanizados. De manera que, para seleccionar un sistema adecuadamente, es importante tomar en cuenta los costos de inversión así como los costos de operación dentro

de un análisis de proyectos de inversión que calculen el valor presente neto (VPN) o mediante el cálculo de una tasa interna de retorno (TIR) en horizontes de inversión de 10 a 15 años.

El sistema secundario compuesto de reactor anaerobio más filtro percolador presenta costos de operación intermedios entre el reactor anaerobio + lagunas y el reactor anaerobio + lodos activados. El filtro percolador, a pesar de tener un sistema de aireación por convección natural tiene algunos elementos mecánicos como bombes, brazo distribuidor y sedimentador secundario, a diferencia de los sistemas naturales.

Por último, si se tiene como base el costo de una planta con tratamiento convencional de lodos activados, el costo de inversión de una planta de tratamiento a nivel terciaria con nitrificación y desnitrificación, aumentaría en un 30-40%, mientras que una planta con operaciones unitarias para tratamiento avanzado (carbón activado, filtros, membranas, etc) puede incrementarse el monto de inversión a valores superiores al 60% (Romero, 2004).

Análisis,
**SELECCIÓN E INTEGRACIÓN
DE OPCIONES DE SISTEMAS
PARA LA CAPTACIÓN,
CONDUCCIÓN, TRATAMIENTO
Y REÚSO DE LAS**
aguas residuales



Como se ha comentado en capítulos anteriores, una buena parte del área de la Península de Yucatán está compuesta por suelo a base de roca caliza, formando un sistema cárstico que se caracteriza, entre varios aspectos, por la escasez e incluso ausencia de cuerpos de agua superficiales (ríos, humedales y lagos).

Por el tipo de roca, el agua de la lluvia, y las aguas residuales crudas o tratadas descargadas directamente sobre la superficie del terreno, se infiltran con rapidez a través del suelo sin mediar tratamiento natural alguno por parte del mismo. Ello, produce la contaminación directa del acuífero cárstico y facilita el transporte de los contaminantes a través del agua subterránea afectando, entre otras, a las comunidades humanas que hacen uso del agua.

Como se ha comentado con anterioridad, para descargar agua tratada a un acuífero para su recarga (lo que sucede en los hechos en la península de Yucatán, aunque no sea el objetivo original) se debería cumplir con la Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, que

establece los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada, la cual, además, hace referencia a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 que regula la calidad del agua potable; es decir, el agua a ser descargada en la península de Yucatán debería ser, al menos, tipo potable. Ello implica, desde el punto de vista económico, algo sumamente difícil de cumplir por el tamaño y la complejidad de las plantas de tratamiento requeridas así como por las condiciones económicas y sociales que privan en la región en la actualidad.

Bajo este marco de referencia, el manejo, tratamiento y disposición de las aguas residuales en la península de Yucatán debe estar orientado, dentro de lo posible, al reúso para disminuir la extracción de agua de primer uso del acuífero y minimizar el impacto por la infiltración de aguas residuales tratadas con calidad inferior a la especificada por la NOM-014-CONAGUA-2003. Este es el enfoque que orienta lo que se describe a continuación.

DEFINICIÓN DE
LAS VARIABLES
INVOLUCRADAS
PARA EL
análisis

La contaminación de la cuenca hidrológica en la península de Yucatán es generada por prácticas inadecuadas derivadas de actividades humanas (descargas de aguas residuales domésticas, municipales y/o industriales) las cuales se encuentran centralizadas en localidades o poblaciones. Estas localidades pueden tener la población dispersa o concentrada; el hecho de que esté en una forma o en otra tiene un impacto importante en cuanto a la cobertura, el sistema de saneamiento (centralizado o descentralizado) y el destino del agua tratada.

La unidad de análisis (Figura 6.1) más pequeña es la localidad o población y es en ella donde se da inicio al algoritmo de análisis de la cuenca. En dado caso que no pueda resolver satisfactoriamente el manejo de las aguas residuales y pluviales en esta unidad de análisis, ésta deberá ampliarse a una unidad mayor que es la comarca y la cual puede estar constituida por varias localidades o poblaciones, incluyendo la que se toma como unidad de análisis inicial. En este ámbito, las localidades deberán interactuar para resolver adecuadamente el manejo de las aguas residuales y pluviales en forma conjunta.



FIGURA 6.1 DEFINICIÓN DEL TAMAÑO DE LA UNIDAD DE ANÁLISIS.

n ámbito de mayor alcance territorial lo constituye el municipio, lo cual puede abarcar un mayor número de localidades interactuando entre sí o darse el caso extremo, en zonas densamente pobladas, que el municipio concentre en una sola población prácticamente la totalidad de su población.

El análisis debe iniciar con unidades pequeñas y debe incrementarse el radio de análisis a regiones o municipios en el caso que no se logre dar solución a las unidades de análisis más pequeñas.

En la unidad de análisis estarán interactuando los siguientes factores:

Existencia
**DE UNA O VARIAS
DESCARGAS DE AGUAS
RESIDUALES.**

Es ideal contar con una sola descarga de agua residual. Para el caso de que existan varias descargas se deberá analizar la posibilidad de interconectarlas mediante colectores para generar solamente una y enviarla a su tratamiento y disposición. Obviamente se da por sentado que existe una cobertura (tratando que sea la mayor posible) de drenaje en buen estado, de no haberlo o si es necesaria su rehabilitación, hay que construirlo con la premisa de que este nuevo drenaje sea separado, es decir que conduzca solamente agua residual y no la pluvial. Se deberá construir en paralelo el drenaje exclusivo para el agua pluvial. Ello conlleva un ahorro de recursos en cuanto al manejo de aguas residuales y de agua pluvial contaminada.

Tipo

DE DESCARGA

Este factor tiene que ver con las características físicoquímicas de la descarga de agua residual; es decir, si puede ser catalogada como una descarga típicamente municipal, de lo contrario se presumen aportaciones de descargas industriales y/o agrícolas.

Tipo

DE REÚSO DE AGUA

En la unidad de análisis hay que explorar y definir el potencial de reúso del agua como agua tratada. Es posible un reúso municipal (riego de jardines, lavado de automóviles, fuentes de ornato por ejemplo), uso industrial (sistemas de enfriamiento, lavado de maquinaria y transporte por ejemplo) y/o para riego agrícola. Hay que tomar en cuenta que, en términos generales, el reúso del agua puede tener altos costos de inversión y operación relacionados sobre todo con el transporte (pipas, bombeo, redes de distribución de agua tratada, medidores, infraestructura civil, etc.) y que no siempre una localidad podrá tener tanto la demanda del recurso, como el potencial para sostener dicha infraestructura.

Disponibilidad

DE ÁREA PARA UBICACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR).

Se deberá explorar la posibilidad de contar con al menos una PTAR para la unidad de análisis favoreciendo, dentro de lo posible, a las tecnologías extensivas (lagunas, humedales, etc.) por sus bajos costos de operación y mantenimiento. Para ello se requiere área; este factor determinará en gran medida si la tecnología a aplicar es de tipo extensiva (área grande) o compacta y, en un caso extremo, la factibilidad de construir o no una PTAR en la unidad de análisis.

Condiciones

TOPOGRÁFICAS DE LA UNIDAD DE ANÁLISIS.

Se debe considerar si el terreno es plano o presenta importantes desniveles. Ello es importante considerarlo para evaluar la posibilidad de interconexión de descargas, construcción de colectores e inclusive para definir un tipo de tecnología en la PTAR.

Determinar

LA EXISTENCIA DE PTAR Y SU ESTADO OPERATIVO.

Es necesario identificar la existencia de plantas de tratamiento de aguas residuales en la unidad de análisis con el objeto de conocer la capacidad de tratamiento de las mismas e incorporarlas al esquema integral del manejo de la cuenca que se esté planteando.

El objeto primordial es la protección y, en su caso, el saneamiento de la cuenca, idealmente aparejado con el reúso de agua. Con ello en mente es importante perseguir las siguientes premisas:

- | *Cumplir con la normatividad vigente.*
- | *Favorecer la descarga de agua residual tratada a barrancos, cañadas o sobre terreno siempre y cuando se cumpla la normatividad vigente y que haya capacidad de tratamiento por parte del suelo. Este tipo de disposición prácticamente no sería posible en la península de Yucatán, debido a la naturaleza cástica del suelo.*
- | *Propiciar, en la medida de lo posible, el uso de agua tratada en actividades municipales, agrícolas y/o industriales.*
- | *Tender a construir plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) medianas a grandes para evitar costos asociados con la economía de escala desfavorable en plantas pequeñas o muy pequeñas.*

- | *Tender a construir PTAR con sistemas extensivos dentro de su tren de tratamiento (lagunas cubiertas, humedales artificiales) por sus bajos costos de operación y mantenimiento, aspectos que aseguran una operación sostenible en el largo plazo.*
- | *Favorecer los sistemas de conducción y tratamiento de aguas residuales que vayan acorde con políticas de mitigación del cambio climático.*
- | *Evitar, dentro de lo posible, estaciones de bombeo de agua residual o cruda y/o agua tratada. En términos generales, esta premisa sería difícil de cumplir en la península de Yucatán derivado a su topografía la cual es esencialmente plana; sin embargo, si pueden haber casos donde aplique.*

CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS EN *la cuenca*

El procedimiento de análisis parte de la definición de la unidad de análisis la cual puede ser una localidad, una región con varias localidades o un municipio. En la unidad de análisis, cualquiera que esta sea, se generarán aguas residuales y agua de lluvia contaminada con agua residual en el caso de aquellas unidades de análisis que no tengan el drenaje separado. De aquí es posible visualizar la importancia de contar con un drenaje separado, pues el manejo del agua de lluvia contaminada, lo cual supone caudales importantes en regiones lluviosas, se torna complejo y costoso.

En la Figura 6.2 se esquematiza la conceptualización general que está detrás del análisis planteado para el manejo, tratamiento y disposición del agua en una cuenca en donde existen varias localidades.

La localidad recibirá agua para consumo de primer uso de una planta potabilizadora la cual extrae agua de una fuente primaria que puede ser un río, presa, embalse, lago o de un acuífero para el caso particular de la península de Yucatán.

El agua residual generada en la unidad de análisis deberá ser tratada en una planta de tratamiento de aguas residuales con un nivel de tratamiento secundario para generar agua tratada de calidad para reúso.

En el caso de existir excedentes de agua tratada o de agua residual que no pudiera ser tratada en la unidad de análisis, se exportan a otra unidad de análisis para ser reusada o tratada según sea el caso. Ello implica la construcción de colectores que transporten el agua de un lugar a otro de preferencia aprovechando la gravedad.

De esta forma se puede abarcar la totalidad de localidades en una cuenca en donde se exige una colaboración y entendimiento muy estrecho entre una localidad y otra para compartir el agua, potenciar el reúso y proteger el cuerpo de agua.

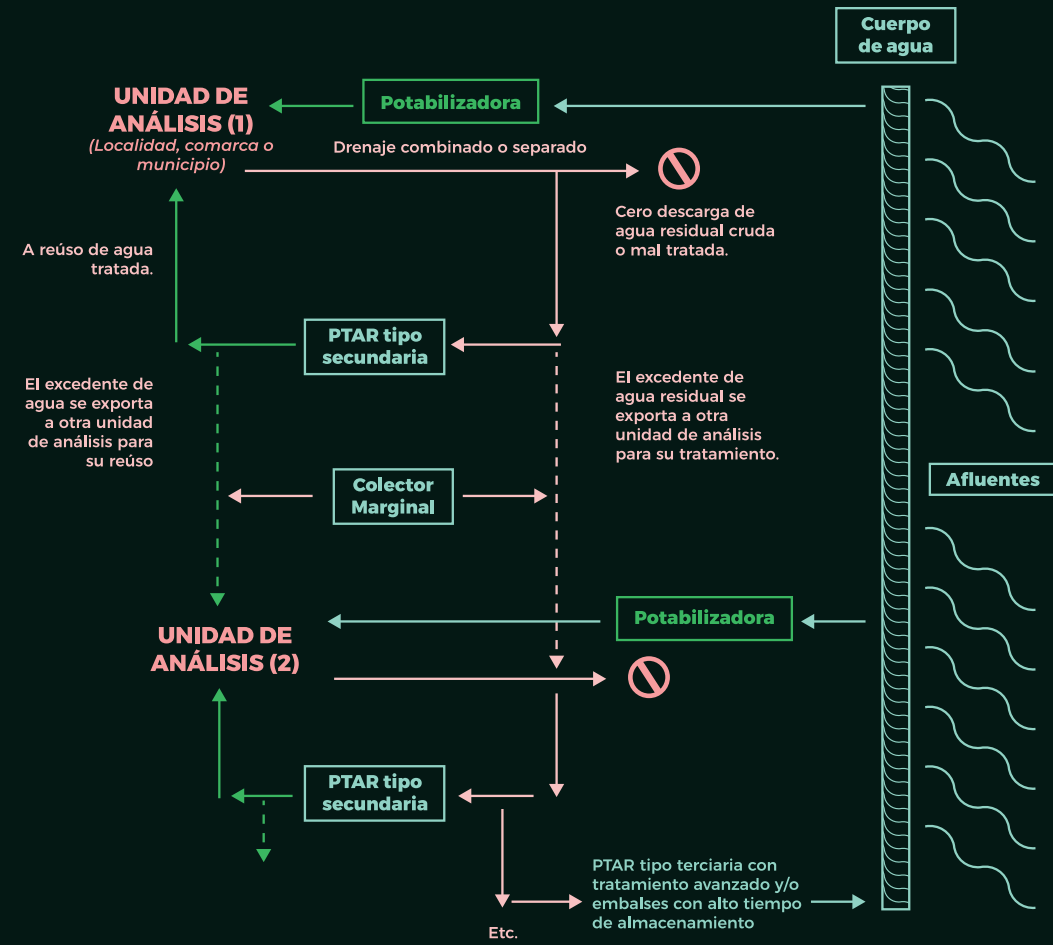


FIGURA 6.2 ESQUEMA GENERAL PARA EL MANEJO DE AGUA ENTRE LOCALIDADES

La aplicación de este esquema para el saneamiento integral de la península de Yucatán implica retos importantes a atender. Hay que construir redes de drenaje centralizado en la mayoría de la ciudades y centros de población no dispersa, entre otros aspectos.

Para el caso de centros de población con baja densidad poblacional y sobre todo con población dispersa (muy común en la península), hay que considerar la opción de un tratamiento descentralizado.

En la Figura 6.3 se presenta un esquema que sintetiza en forma conceptual las opciones del manejo del agua contaminada en una unidad de análisis perteneciente a una cuenca.

El agua residual generada puede ser tratada mediante plantas de tratamiento de aguas residuales que estén centralizadas o mediante un sistema de tratamiento descentralizado.

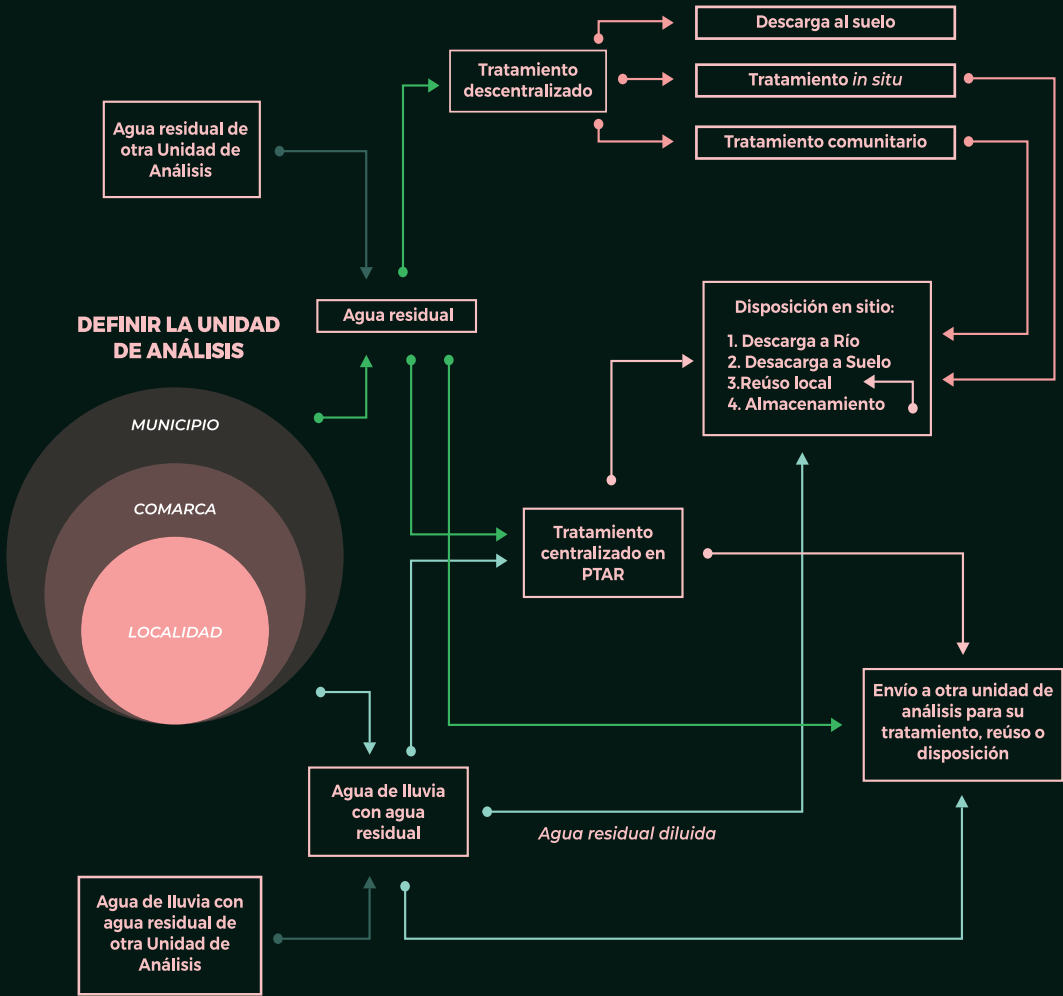


FIGURA 6.3 ESQUEMA DE OPCIONES PARA EL MANEJO DE AGUA CONTAMINADA EN UNA UNIDAD DE ANÁLISIS.

6 . 2 . 1

PLANTAS DE TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES
CENTRALIZADAS Y
DESCENTRALIZADAS

EL TRATAMIENTO

centralizado.

Este tipo de tratamiento de las aguas residuales depende de la conducción efectiva de las mismas (recolección centralizada de las aguas residuales) por medio de un drenaje a la planta de tratamiento. La operación de la PTAR puede estar a cargo del municipio, de un organismo operador público o privado o de una entidad estatal o federal encargada de ello. Este enfoque para la gestión del saneamiento depende de forma muy fuerte de la existencia de recursos económicos suficientes para su manutención.

EL TRATAMIENTO

descentralizado.

El saneamiento descentralizado, de manera general, necesita un abordaje individualizado con orientación específica, necesita esfuerzos estratégicos (capacitación a la población beneficiaria, cuidado en el manejo de desechos, atención y seguimiento por parte de las autoridades sanitarias, mantenimiento a instalaciones) , sociales y un profundo nivel de compromiso comunitario.

Se puede concebir a las plantas descentralizadas desde la unidad mínima posible, una planta para una casa habitación, hasta plantas pequeñas que den servicio a poblaciones de mil habitantes o menos. Este criterio puede modificarse según sean las condiciones del caso.

Las tecnologías más comunes a utilizar en un tratamiento descentralizado se refieren al tratamiento in situ (pequeñas plantas de tratamiento a nivel secundario) que pueden ser fosas sépticas o biodigestores anaerobios combinados con humedales artificiales, por ejemplo. Por otra parte, puede plantearse la descarga directa (previo tratamiento con una fosa séptica) de aguas residuales al suelo (cuando este tenga capacidad de tratamiento) para su depuración en el mismo, caso que sería recomendable para casas habitación ubicadas de forma muy dispersa en la unidad de análisis y de muy bajo ingreso económico que imposibilite la atención a un tratamiento in situ.

Por último, se plantea el uso de tratamiento descentralizado comunitario el cual puede estar constituido por un tratamiento anaerobio seguido de un tratamiento natural construido (humedal artificial o laguna, por ejemplo) para el postratamiento del efluente anaerobio. Este tratamiento anaerobio debe contemplar necesariamente el manejo adecuado del biogás mediante su combustión para estar acorde con las políticas de mitigación del cambio climático y un postratamiento de los lodos de purga que

conlleve un composteo o en lechos de secado. Existe para este caso una clara oportunidad para el aprovechamiento del biogás como fuente alterna de energía para estas comunidades potenciado, más aún, si tiene actividad pecuaria de traspasto pues adiciona material orgánico en alta concentración.

En este sentido, ¿Qué conviene más, una planta grande o varias pequeñas? Para responder esta pregunta habría que efectuar un estudio bajo condiciones concretas de proyecto (no es posible entrar en el campo de las generalizaciones) apoyándose bajo la metodología de un análisis de ciclo de vida (determinación de impactos ambientales) en conjunto con un estudio de factibilidad económica. Un proyecto con planta grande, por economía de escala, reduce el requerimiento de insumos y la atención e inversión en la planta en sí, aunque no hay que dejar fuera del escenario la inversión necesaria para la red de drenaje y conducción de las aguas residuales a la planta que conlleva también emisiones de GEI, así como tampoco el transporte de insumos y subproductos hacia y fuera de la planta. En contraste, las plantas pequeñas y más aún las descentralizadas, demandan una mayor inversión y mantenimiento por unidad de volumen tratado (pesos/m³ de aguas tratada), aunque esto puede ser compensado con la cercanía de la fuente de aguas residuales lo cual evita la construcción de drenajes y colectores y se favorece el reúso o la disposición cercana del agua tratada y de los subproductos de la PTAR (biosólidos).

Bajo este contexto hay que preguntarse ¿Qué pasa con las plantas excesivamente descentralizadas en cuanto a su operación?, el punto más importante aquí es que la población servida para este caso debe atender la planta siendo que no son especialistas en ello (en el caso de plantas con tratamiento secundario), además deben entrar en contacto con los residuos y subproductos que genere la planta (biogás, olores, lodos y agua no del todo tratada) para su disposición final poniendo en riesgo su salud. Por ejemplo, el uso de baños secos, combinados en el mejor de los casos, con digestores anaerobios para la degradación de la materia orgánica. En estos casos hay que prever el manejo y traslado de los residuos (heces fecales) al digestor y la disposición de los lodos del digestor con los consecuentes riegos a la salud. Por otra parte, si el digestor anaerobio no posee un quemador de biogás, el metano (uno de los GEI más potentes) generado en la digestión anaerobia se está emitiendo a la atmósfera lo que no favorece a la mitigación del cambio climático. Para la aplicación de esta opción, todo lo anterior deberá ser considerado adecuadamente a través de una gestión horizontal y vertical que involucre decididamente a la comunidad.

Por otra parte, cabe la posibilidad de que el agua generada no pueda ser tratada ni dispuesta en la unidad de análisis en cuestión por lo que el agua tendría que ser enviada a otra localidad o región, es decir a otra unidad de análisis dentro de la cuenca. El aporte de aguas residuales de otra unidad de análisis, entonces, deberá ser sumado a la nueva unidad de análisis.

6 . 2 . 2

MANEJO DEL AGUA DE LLUVIA CONTAMINADA CON AGUA RESIDUAL

En paralelo al manejo de las aguas residuales, hay que considerar en la unidad de análisis el aporte de agua de lluvia contaminada con agua residual en aquellos lugares donde se carece de un drenaje separado. La característica determinante de este tipo de efluentes es su carácter estacional, la alta variación del caudal y el factor de dilución de los contaminantes del agua residual. Si es un caudal limitado y que puede ser manejado en la planta de tratamiento, es recomendable tratarla en este sistema. Por otra parte, si el factor de dilución es tal que cumple por sí sola con la legislación en cuanto a la restricción de contaminantes para ser descargada a un cuerpo de agua, al suelo o ser utilizada en actividades de reúso, se deberá contemplar este abanico de opciones. Si no pudiera ser manejada en las opciones antes mencionadas, el agua de lluvia contaminada deberá ser enviada y sumada mediante un colector a otra unidad de análisis para su disposición y/o tratamiento.

La cantidad de agua de lluvia en una unidad de análisis debe ser predicha mediante un estudio hidrológico acompañado por uno hidráulico para estudiar el comportamiento del flujo de agua en las barrancas, cañadas y afluentes a los cuerpos de agua en general y poder detectar zonas con riesgo de inundación.

DESARROLLO LÓGICO DEL PROCESO DE ANÁLISIS DE UNA CUENCA MEDIANTE UN ALGORITMO PARA LA TOMA DE *decisiones*

En las Figuras 6.4, se muestra el desarrollo lógico para el análisis y toma de decisiones en una cuenca con respecto al manejo y tratamiento de agua contaminada.

El análisis da inicio con la especificación de la unidad de análisis, donde se identifica la cantidad de habitantes a considerar. Para este ejemplo, se ha especificado un número de 1 mil habitantes; sin embargo, este número puede ser ajustado según los intereses y características de lo que se desea analizar. Una respuesta afirmativa o negativa a la pregunta definirá el tipo y magnitud de los sistemas de manejo y tratamiento de las aguas contaminadas que deriva en tratamientos centralizados o descentralizados.

El sentido general de las preguntas con respecto al drenaje conlleva, al final de

cuentas, a la construcción o rehabilitación del sistema de colección de aguas residuales en un drenaje separado, en el caso de que sea posible hacerlo por construcción de uno nuevo, complemento de uno existente o incluso por sustitución de uno viejo. Así mismo, se orienta para la interconexión del sistema de drenaje con colectores marginales de aguas residuales que las conduzcan a una planta de tratamiento.

En el caso de que la población se encuentre dispersa y ello haga no factible económicamente la construcción de un drenaje, se orienta la decisión del manejo de las aguas residuales a tratamientos descentralizados.

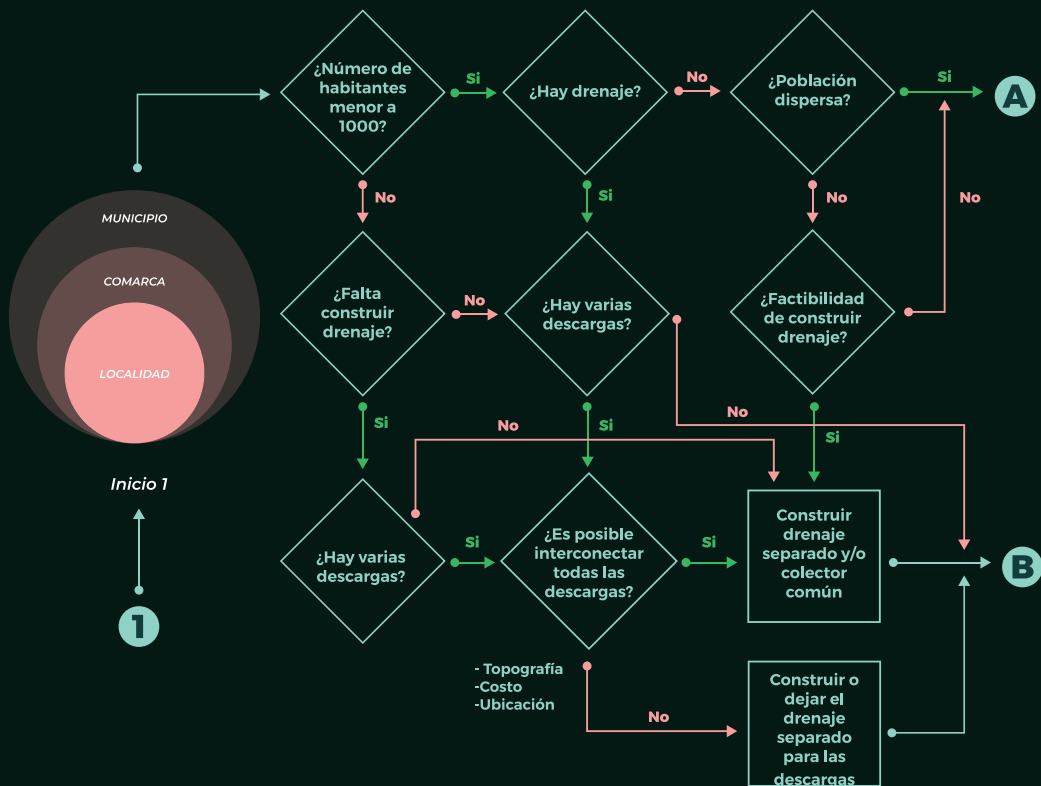


FIGURA 6.4 INICIO DEL ALGORITMO PARA EL ANÁLISIS INTEGRAL DE CUENCA (PARTE I).

Por otro lado, se continúa con el algoritmo lógico para el caso de unidades de análisis con población mayor a 1 mil habitantes y con drenaje y colectores que, al final del tubo, se puede tener agua residual a tratar y disponer.

Se efectúa la pregunta si el agua residual a tratar es típicamente municipal o no. El término típicamente municipal se refiere a una caracterización fisicoquímica tipo de aguas residuales municipales que puede ser consultada en Metcalf y Eddy, 2003. Se tipifica como de fuerza baja, media o alta con concentraciones de demanda química de oxígeno total (DQOt) que se encuentran en un intervalo entre 250 a 800 mg/l, con sólidos suspendidos totales (SST) entre 120 a 400 mg/l.

Cabe la posibilidad, con alta frecuencia, que la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales se aleje de lo considerado como típicamente municipal debido a descargas industriales las cuales pueden estar plenamente identificadas o no. Para el caso que se encuentren identificadas, habrá que gestionar ante las industrias el cumplimiento de la legislación en materia de descargas de este tipo al drenaje. El

criterio en este caso podría ser que la calidad del agua industrial, por lo menos, equipare la calidad de agua que lleve el drenaje típicamente caracterizado como agua residual municipal. El Municipio es responsable de normar este aspecto tomando como base y consideración la NOM-002-SEMARNAT- 1996. Para ello, la industria deberá prever y efectuar el tratamiento a su costo de sus efluentes dentro de las instalaciones industriales o en un parque de tratamiento de aguas industriales que proporcione servicio a varias industrias.

Es conveniente que la autoridad, especializada en el manejo y tratamiento de aguas residuales, oriente al industrial sobre el tipo de tecnologías disponibles para efectuar el tratamiento de las aguas residuales en un sector industrial en específico debido a que es frecuente encontrar en el sector industrial fraudes que conllevan a que las PTAR instaladas no funcionen y en atención de que el industrial no necesariamente es o debe ser un especialista en tratamiento de las aguas residuales. Queda claro que al final de

cuentas, la decisión y responsabilidad recaerá en su totalidad en el industrial.

Por otra parte, lamentablemente hay casos en que ciertas industrias evaden dicha responsabilidad y descargan clandestinamente sus aguas residuales al drenaje y, en un caso peor, directamente en los cuerpos de agua. Ha sucedido, en casos extremos, que la actividad industrial de una localidad o de una unidad de análisis se encuentre “disfrazada” como descargas de casas habitación, siendo que no es así pues dicha actividad industrial se ha fragmentado de tal forma que se ejecuta en las casas habitación haciendo prácticamente imposible la detección, identificación y prevención de las descargas industriales. Este caso se ha presentado en sectores como la industria textil, alimenticia y automotriz, por ejemplo. Se recurre a la maquila y mano de obra en las casas habitación y no en un establecimiento fabril especializado para ello. Así mismo puede suceder en la industria pecuaria de traspatio.

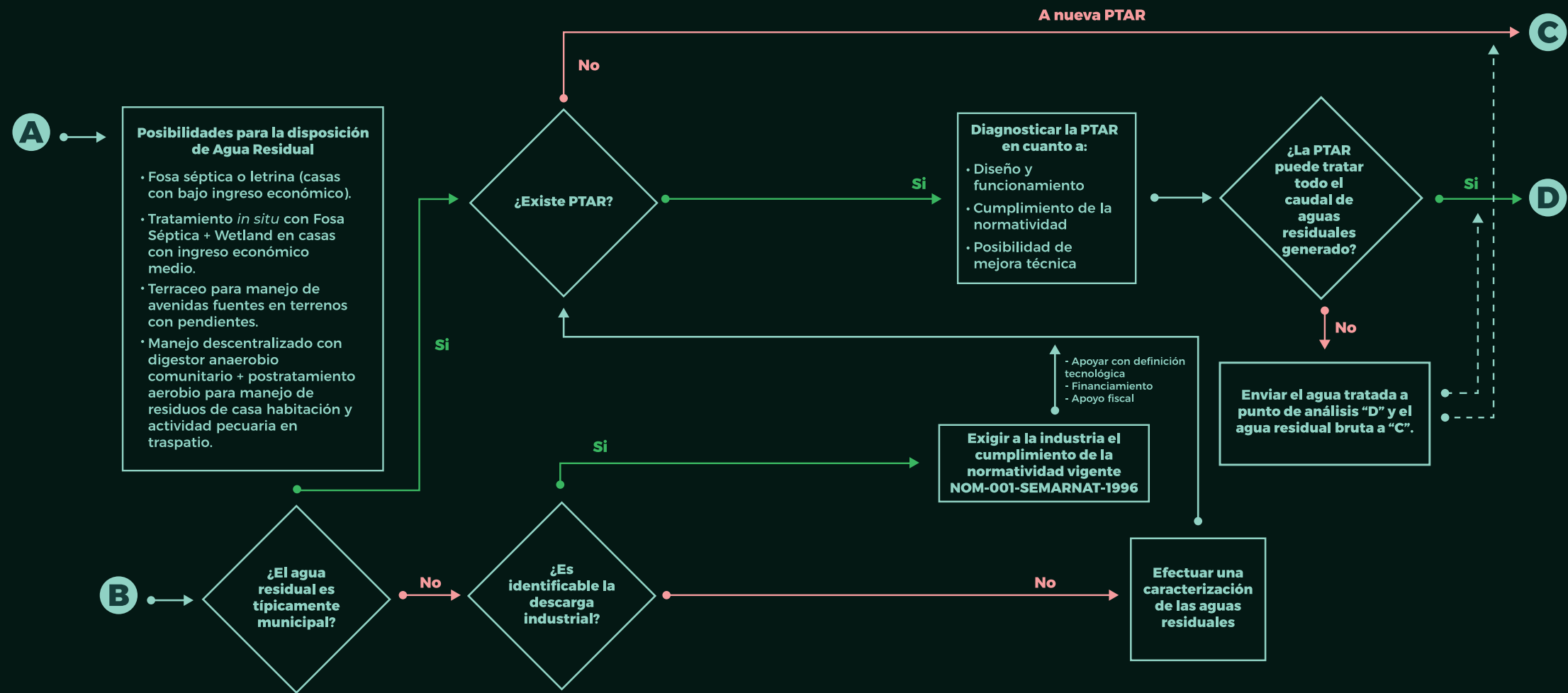


FIGURA 6.4 CONTINUACIÓN DEL ALGORITMO PARA EL ANÁLISIS INTEGRAL DE CUENCA (PARTE II).

Para el caso en el que existan descargas de aguas residuales industriales al drenaje municipal pero que no puedan ser identificadas o controladas en lo inmediato, y en un sentido de practicidad para resolver el problema de contaminación de los cuerpos de agua, se recomienda proceder con una caracterización de las aguas residuales que llegan al sitio donde se instalará la PTAR y en función de ello definir la tecnología a utilizar en la planta de tratamiento.

El algoritmo procede con la pregunta si existe una planta de tratamiento o no en la unidad de análisis, en el caso negativo entonces se procederá al diseño de una nueva considerando la caracterización de las aguas residuales ya establecida. Para el caso en que exista una planta de tratamiento, se indica que hay que proceder con un diagnóstico técnico de la misma para determinar si el diseño original de la planta fue el adecuado en función de las bases de diseño originales, para determinar su funcionabilidad actual y si la planta de tratamiento es capaz de admitir y tratar el agua residual generada en el momento y a futuro con la calidad adecuada para su disposición.

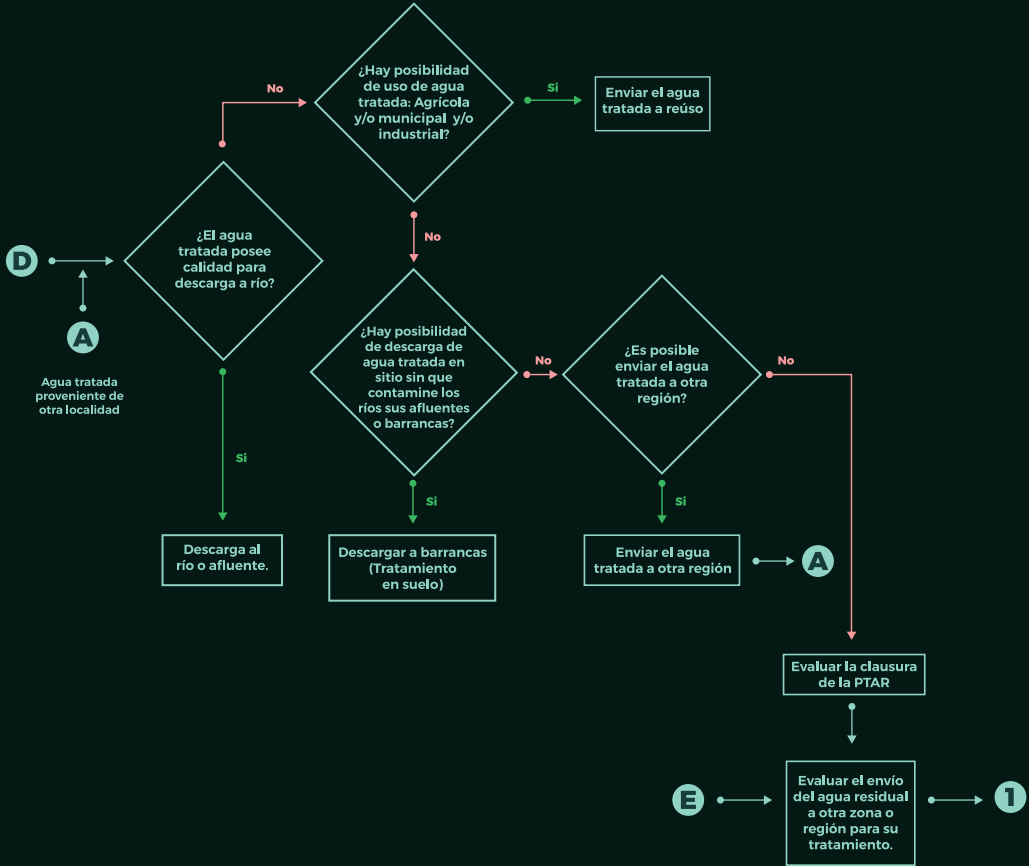


FIGURA 6.4 CONTINUACIÓN DEL ALGORITMO PARA EL ANÁLISIS INTEGRAL DE CUENCA (PARTE III).

En el caso de existir una planta de tratamiento de aguas residuales en la unidad de análisis que sea capaz de tratar toda el agua residual generada y después de efectuar un diagnóstico del estado de la misma y determinar su capacidad de tratamiento en cuanto a la calidad de agua tratada generada, se debe especificar si esta calidad de agua es apta para ser descargada directamente a un cuerpo de agua en función de la legislación que prive en la unidad de análisis y/o para ser utilizada en actividades municipales, agrícolas o industriales y/o para ser descargada en barrancas (tratamiento en suelo). El qué hacer con el agua tratada será una decisión según la conveniencia en el ámbito de la unidad de análisis; evidentemente, ello deberá sujetarse a la legislación vigente en la materia.

Hay que considerar que, en algunas zonas, la utilización de agua tratada puede resultar costoso, pues se requiere de infraestructura para ello que no necesariamente puede estar lista o construida. Hay que tomar en cuenta el

transporte del agua (en pipas o tubería lo que implica bombeo en la mayoría de los casos), sistemas de distribución, personal operativo y de mantenimiento de la red, etc. En muchos casos, la descarga tratada a río o a barrancas o a riego por gravedad puede ser lo más aplicado.

Puede existir la posibilidad de que no se pueda utilizar o disponer el agua tratada en la unidad de análisis, ello tendría como consecuencia enviar el agua tratada a otra unidad de análisis o región para su aprovechamiento o disposición, aprovechando que ya existe la planta de tratamiento de aguas residuales. Si esto último no fuera posible tampoco, no habría razón para la existencia de la planta de tratamiento por lo que hay que evaluar la clausura de existir esta. En este caso, el agua residual deberá ser enviada para su tratamiento a otra región o unidad de análisis. Para este caso, siempre hay que tomar en cuenta que una infraestructura operativa es valiosa y de clausurarse, está deberá reponerse en alguna otra ubicación demandando inversión.

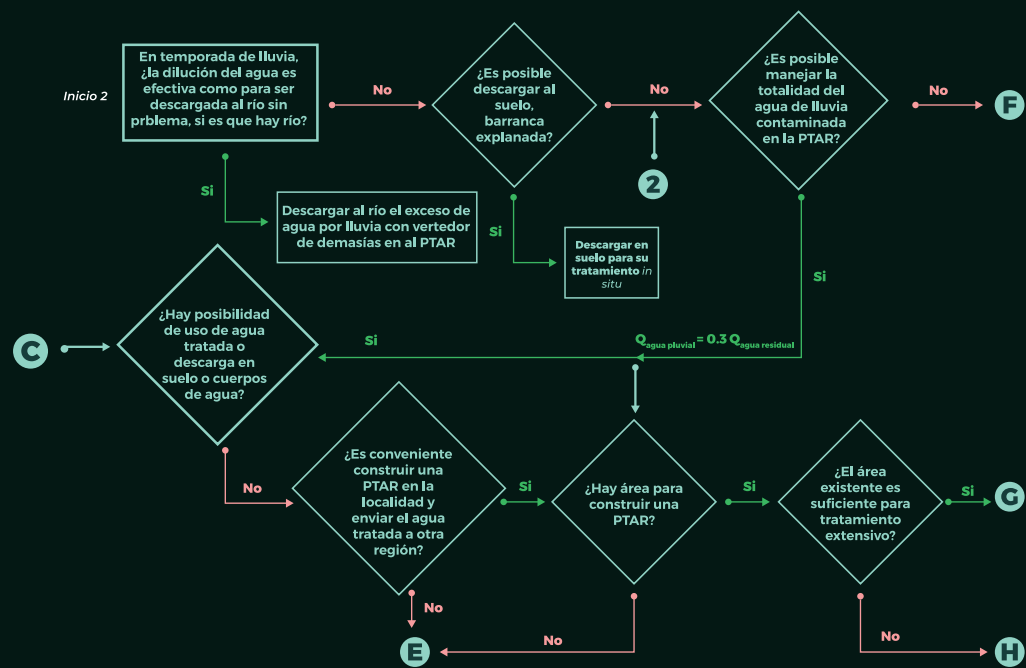


FIGURA 6.4 CONTINUACIÓN DEL ALGORITMO PARA EL ANÁLISIS INTEGRAL DE CUENCA (PARTE IV).

En el caso de que no exista una planta de tratamiento, se ha recomendado considerar la construcción de una en la unidad de análisis antes de enviar o trasladar el agua residual a otra región o unidad de análisis. Sin embargo, antes de proceder con el proyecto de construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales es necesario considerar el destino del agua tratada y para ello hay que saber si hay posibilidades de reúso, de descarga a suelo o descarga a cuerpos de agua cumpliendo con la legislación dentro de la unidad de análisis. Para el caso de que no sea posible usar o disponer el agua tratada en la unidad de análisis, habría que considerar la posibilidad de construir la planta dentro de la unidad de análisis, pero para enviar el agua tratada a otra región o unidad de análisis. Si este fuera el caso o se deseara construir una planta de tratamiento de aguas residuales para reúso de agua o descarga a barrancas, pero no hubiera área disponible para su instalación, el agua residual se tendría que enviar a otra zona o unidad de análisis.

En la lógica del análisis del que hacer con las aguas contaminadas generadas dentro del ámbito de la unidad de análisis se llega al punto de tener que considerar el agua de lluvia que ha sido contaminada con agua residual en un drenaje combinado. Son dos aspectos básicos los que hay que atender para dar una salida fácil y económica al problema; es decir, considerar lo que especifica la legislación en cuanto a límites máximos permisibles de contaminantes para descarga directa a cuerpos de agua y el factor de dilución que implica la mezcla de agua de lluvia con agua residual. Es posible que la dilución de los contaminantes sea tal que el agua de lluvia, a pesar de estar contaminada, pueda ser descargada sin tratamiento al cuerpo de agua. Para considerar este criterio, es necesario contar con los volúmenes de agua de lluvia que se generan en la época lluviosa a distintos periodos de retorno (se recomienda de 10 años) en la unidad de análisis y para ello se debe efectuar un estudio hidrológico de la zona.

Para el caso que no sea suficiente la dilución de contaminantes con el agua de lluvia para cumplir con la legislación para descarga a cuerpos de agua, habrá que considerar la descarga a suelo (barrancas si existen) y/o su tratamiento en una

planta de tratamiento de aguas residuales. Para ello se considera que el volumen del agua de lluvia no sobrepase el 30 por ciento del volumen de aguas residuales generadas en la unidad de análisis, de lo contrario, la planta de tratamiento sería muy grande. Si se llega a superar este porcentaje, habrá que considerar complementar la planta de tratamiento de aguas residuales convencional con un módulo fisicoquímico que trabajaría en paralelo al módulo convencional y lo haría en la época de lluvias.

La cantidad de agua a tratar en la planta de tratamiento convencional y en el módulo fisicoquímico estará dado por la dilución que tengan los contaminantes en el agua de lluvia y la dilución adicional que se pudiera lograr al mezclar el agua de lluvia contaminada con el agua tratada de las plantas de tratamiento. Todo ello con la vista puesta para descargar al cuerpos de agua cumpliendo con la legislación.

En el caso de que no pueda ser tratada en planta de tratamiento de aguas residuales el agua de lluvia contaminada se deberá considerar almacenarla y tratarla en un embalse específicamente diseñado para ello o en su defecto enviarla a otra región o unidad de análisis.

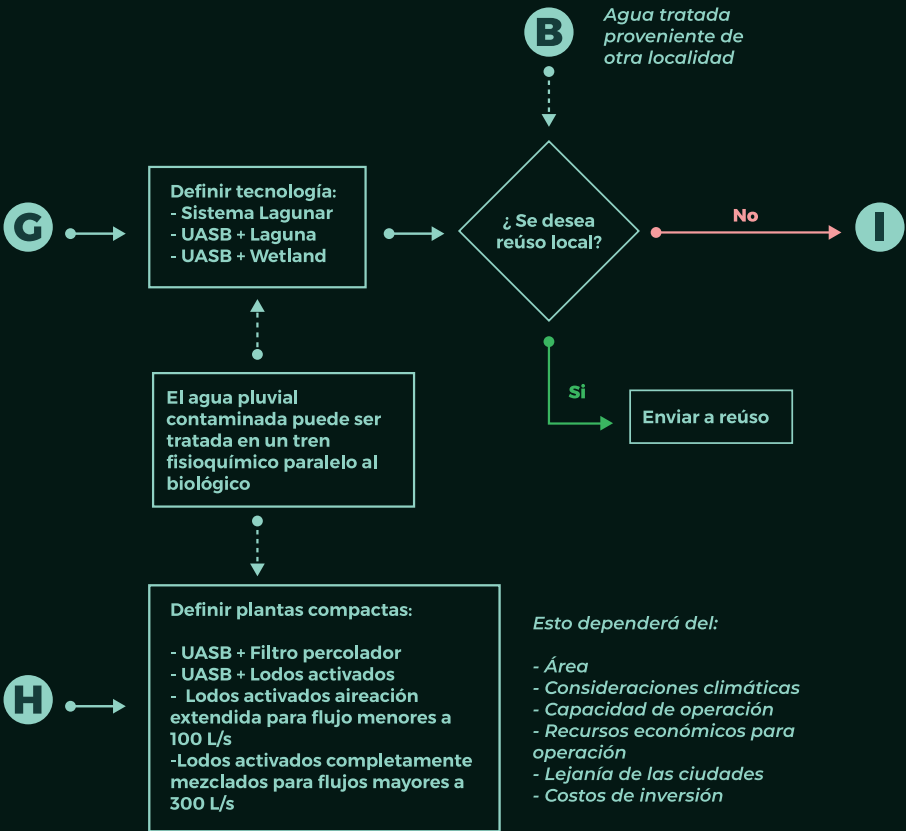


FIGURA 6.4 CONTINUACIÓN DEL ALGORITMO PARA EL ANÁLISIS INTEGRAL DE CUENCA (PARTE V).

El siguiente paso es definir si hay área o no y si ésta es apta para la posible aplicación de sistemas extensivos (dependerá además de la topografía y tipo de suelo del lugar). En el caso afirmativo es conveniente considerar los sistemas lagunares y los humedales artificiales además de los sistemas compactos de tratamiento; para el caso de que la respuesta sea negativa, solamente se considerarán estos últimos.

Se proponen trenes de tratamiento que por su integración aseguran tender a criterios de sustentabilidad (anaerobios + aerobios) y otros que son muy usuales en la región. En un proceso de licitación y con el objeto de tener un mayor número de opciones a evaluar, es importante solicitar a las empresas de ingeniería interesadas que presenten propuestas considerando alguno de los trenes de tratamiento que se sugieren. En tal caso, se desarrollaría un proceso de licitación con tecnología abierta. Otra forma de proceder es seleccionar el proceso de tratamiento antes de llamar a las empresas interesadas en su construcción, de forma que éstas elaboren sus propuestas con tecnología ya predefinida. Si esta es la opción conveniente, es recomendable que en el proceso previo se involucre un consultor

experto e independiente. Esto se debe a que, en tal caso, para el proceso de selección de la tecnología, es importante contar con la asesoría de un experto.

El siguiente paso es la evaluación de las opciones tecnológicas propuestas y sujetas a evaluación. Para ello es requisito contar con información mínima para alcanzar una decisión con sustento y transparencia. Para cualquiera de las dos opciones de licitación seleccionadas (con tecnología abierta o predefinida) es de gran importancia definir los elementos de información que deben incluir las ofertas, ya que solo así se podrá desarrollar un proceso de comparación, evaluación y selección objetivo y claro. Estos atributos en un proceso de toma de decisiones son muy valiosos para alcanzar consensos entre los involucrados y permiten comunicar mejor a la sociedad el resultado del proceso, al documentarlo y hacerlo transparente.

Para definir la planta de tratamiento de aguas residuales es importante considerar también el destino del agua tratada que podrá ser para reúso de agua, descarga a barranca o cuerpo de agua o su almacenamiento en un embalse. En el caso de que no aplique ninguna de las opciones anteriores se deberá entonces enviar a otra región o unidad de análisis.

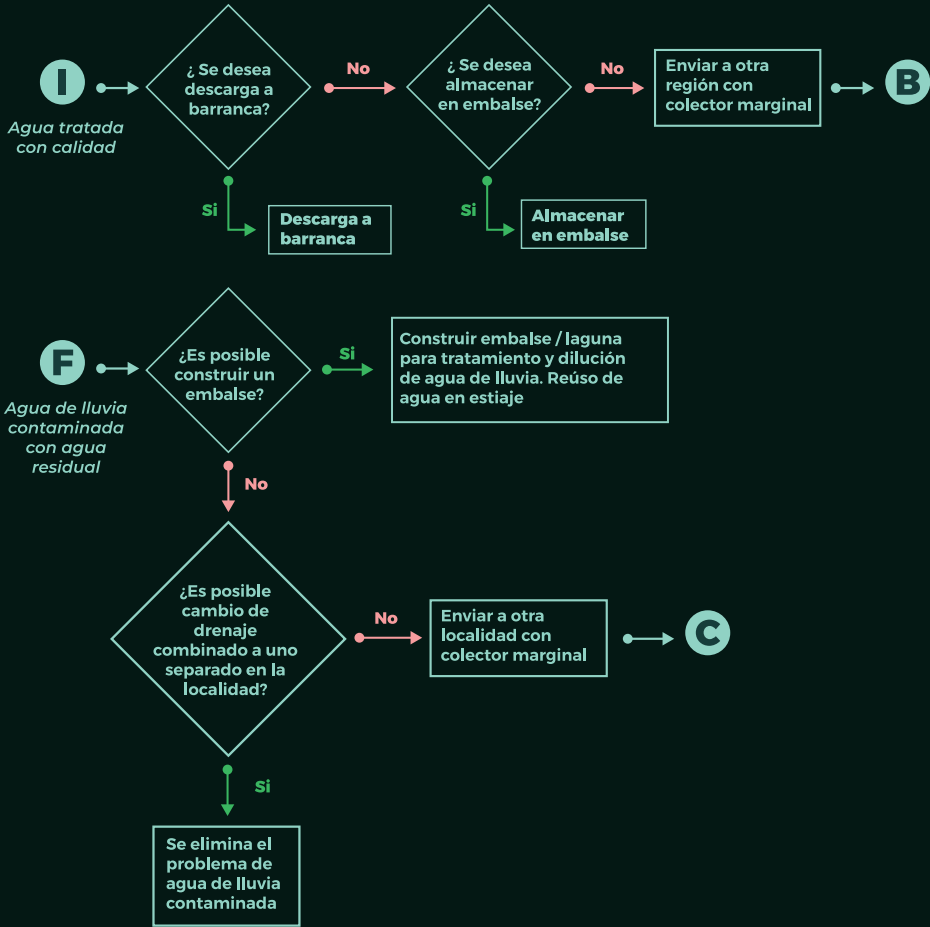


FIGURA 6.4 CONTINUACIÓN DEL ALGORITMO PARA EL ANÁLISIS INTEGRAL DE CUENCA (PARTE VI).

CONCLUSIONES

finales



Esta guía se ha escrito con el objetivo de coadyuvar al desarrollo y adecuada gestión de los servicios de tratamiento de aguas residuales en la región que abarca la Península de Yucatán, en México, considerando las actividades económicas y sociales de los estados que la componen; es decir, Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Para ello, se consideró necesario describir las condiciones y factores que deben tomarse en cuenta en el análisis de una cuenca así, como, en forma más puntual, las tecnologías de tratamiento más adecuadas para aguas residuales provenientes de urbanizaciones, hoteles, industria pecuaria y la industria alimenticia en general con alta concentración de materia orgánica biodegradable, actividades, todas ellas, consideradas como preponderantes en la región.

Cabe señalar que la mayoría de las puntualizaciones que se hacen en la guía, sin duda pueden ser aplicados en otras regiones de México, e inclusive, de Latinoamérica, por lo que la guía, en este sentido posee un mayor espectro de aplicación que solamente la Península de Yucatán.

Los resultados obtenidos a partir de los criterios y el procedimiento establecidos en esta guía estarán alineados con las necesidades de un proyecto en particular. Sin embargo, la

decisión final de tomarlos en cuenta o no es responsabilidad del tomador de decisiones que debe estar apoyado por un equipo humano técnico lo suficientemente versado en el tema de tratamiento de aguas residuales para poder efectuar una correcta interpretación de los resultados obtenidos. Los criterios, conceptos, recomendaciones y algoritmos desarrollados en esta guía no pueden ser tomados o utilizados mecánicamente y en forma abstracta; éstos deben ser siempre acompañados de análisis según las características y necesidades de cada proyecto.

Así mismo, este documento no pretende afectar intereses comerciales legítimos de ninguna entidad u organismo público o privado; por el contrario, busca incrementar el rigor técnico de las ofertas para que éstas realmente atiendan la problemática de cada potencial cliente y puedan así ser sujeto de una evaluación adecuada. Para los no especialistas, la guía presenta un análisis de los elementos pertinentes en materia tecnológica para el tratamiento de las aguas residuales, y bajo criterios eminentemente técnicos, hace una propuesta de metodología para una toma de decisiones más objetiva y transparente, con las recomendaciones que se consideran adecuadas, en un marco de sustentabilidad para la península de Yucatán.

GLOSARIO

glosario



REFERENCIAS

referencias



Cortez, Petronilo Sainos, A., Juan Francisco Gómez, Juan Maldonado, Manuel Rodríguez (2017) *Sistema comercial de organismos de agua potable: organización y funcionamiento para mejorar la calidad del servicio / -- Jiutepec, Mor. : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2017.125 p. ISBN 978-607-9368-95-1 (obra digital)*

CONAGUA. *Programa Hídrico por Organismo de Cuenca, Visión 2030. Gerencia Regional XII Península de Yucatán. México: SEMARNAT.*

CONAGUA (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán. México: SEMARNAT.*

CONAGUA. *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Edición 2014. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.*

CONAGUA (2015). *Programa Hídrico Regional 2014-2018 de la Región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán. México: SEMARNAT.*

CONAGUA (2018). *Estadísticas del Agua en México, Edición 2018. México: SEMARNAT.*

CONAGUA (2019). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en operación, Edición 2019. México: SEMARNAT.*

CONAGUA (2019). *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2019. México: SEMARNAT.*

Cerda U., Arcadio (2003) *Empresa, competitividad y Medio Ambiente. Panorama Socioeconómico, ISSN: 0716-1921, núm. 26, mayo, 2003, Universidad de Talca, Talca, Chile*

INEGI (2017) (1). *Anuario estadístico y geográfico de Campeche. 2017. México: INEGI.*

INEGI (2017) (2). *Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo. 2017. México: INEGI.*

INEGI (2017) (3). *Anuario estadístico y geográfico de Yucatán. 2017. México: INEGI.*

INEGI (2017) (4). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2017. México: INEGI.*

INEGI (2020) (1). *Panorama Sociodemográfico de México 2020. Campeche. México: INEGI.*

INEGI (2020) (2). *Panorama Sociodemográfico de México 2020. Quintana Roo. México: INEGI.*

INEGI (2020) (3). *Panorama Sociodemográfico de México 2020. Yucatán. México: INEGI.*

INEGI. <http://cuentame.inegi.org.mx/>

INEGI. <https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2017/default.html#Tabulados>

INEGI (Sistemas de Cuentas Nacionales). <https://www.inegi.org.mx/datos/?init=2>

Jiménez B., Torregrosa M. L. y Aboites, L. (2010) *El Agua en México; Cauces y Encauces*. Academia Mexicana de Ciencias, ISBN 978-607-95166-1-1.

Programa Nacional Hídrico-2013-2018. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales-CONAGUA.

Kauffer, E.; Villanueva, C. (2011). *Retos de la Gestión de una cuenca construida: La Península de Yucatán en México*. Aqua-LAC, 3(2), p.p. 81-91.

Rolim Mendoza Sergio (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización*. Primera edición, McGraw Hill. Colombia.

Metcalf & Eddy Inc (2003). *Wastewater Engineering. Treatment, disposal, reuse*. McGraw Hill, 4th Edition

Miranda A., María Guadalupe y Lot Helgueras, Antonio. (1999). *El lirio acuático, ¿una planta nativa de México?* Ciencias 53, enero-marzo, 50-54. [En línea]

Morgan-Martínez, Carolina (2020) *Índice para medir la pobreza por carencia de agua potable en los hogares de la Ciudad de México por la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2018*. Tesis de Maestría en Economía.- Posgrado en Economía, Facultad de Economía de la Universidad Nacional Autónoma de México. En prensa. Comunicación oral.

Morgan-Sagastume, J.M., Revah Moiseev, S., y Noyola, A. (2001)

Algunas tecnologías para la remoción de H₂S por vía fisicoquímica y microbiológica.

Publicado en la revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos (IMIQ), Vol. 9-12, Septiembre Diciembre, Pp. 207-215

Nils Janson (2009) *Guía sobre la Participación Privada en la Prestación de los Servicios de Agua y Saneamiento* Comisión Nacional del Agua Proyecto de Fortalecimiento del Manejo Integrado del Agua (PREMIA) Programa de Trabajo CNA 2009

<http://www.conagua.gob.mx/conagua07/Contenido/Documentos/Gu%C3%ADaParticipacionPSP.pdf>

Noyola Adalberto, Heller leo, Otterstetter, Horst (2010). *Los desafíos para la universalización del saneamiento básico*, en *Determinantes Ambientales y Sociales de la Salud*, Luiz Augusto Galvão, Jacobo Finkelman y Samuel Henao (OPS) Editores. McGraw-Hill Interamericana, 367-381

Noyola Adalberto, Padilla-Rivera Alejandro, Morgan-Sagastume Juan Manuel, Güereca Leonor Patricia y Hernández-Padilla Flor, (2012). *Typology of wastewater treatment technologies in Latin America*. CLEAN – Soil, Air, Water, 40 (9): 926-932.

Noyola, A (2016) *Procesos Biológicos para el tratamiento de Aguas Residuales destinadas al reúso. En Uso seguro del agua para el reúso, capítulo 5*, editores Pilar Tello Espinoza, Petia Mijailova, Rolando Chamy. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria.

Noyola A., Morgan-Sagastume, J.M. y Güereca L.P., (2013) *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ingeniería. ISBN es 978-607-02-4822-1*

Noyola, A., Morgan-Sagastume, J.M. and López, J. (2006) *Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odor control and energy/resource recovery. Biogas Treatment and Odor Control. IWA-Reviews. Eugenio Foresti, Marcelo Zaiat y Marcus Valero, Eds. IWA-Reviews. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 5:93-114. Doi 10.1007/s11157-005-2754-6*

REPDA.<https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/consulta-la-base-de-datos-del-repda>

Revah, S., Morgan-Sagastume, J.M. (2005). *Methods of odor and VOC control. In: Biotechnology for odor and air pollution control, Shareefdeen/Singh Eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 3-540-23312-1 pp. 29-62.*

Rolland L. y Vega Y (2010). *La gestión del agua en México. Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM. Polis 2010, Vol. 6, No. 2, pp.155-188. México.*

Romero, J.A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Colombia: Editorial Colombiana de Ingeniería. 3ra. Edición,*

Salazar Adams Alejandro, N. Lutz Ley, A. (2015) *Factores asociados al desempeño en organismos operadores de agua potable en México Región y sociedad vol.27 no.62 Hermosillo ene./abr. 2015 versión impresa ISSN 1870-3925*

SIAP. <http://infosiap.siap.gob.mx/>

SEMARNAT-2012 *Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región Hidrológica Administrativa XII Península de Yucatán*

Water Environment Federation. *Biological and Chemical Systems for Nutrient Removal. WEF. USA, 1998.*

WEF/ASCE. *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants MOP 8. 5th Edition. ISBN 978-0071663588.*

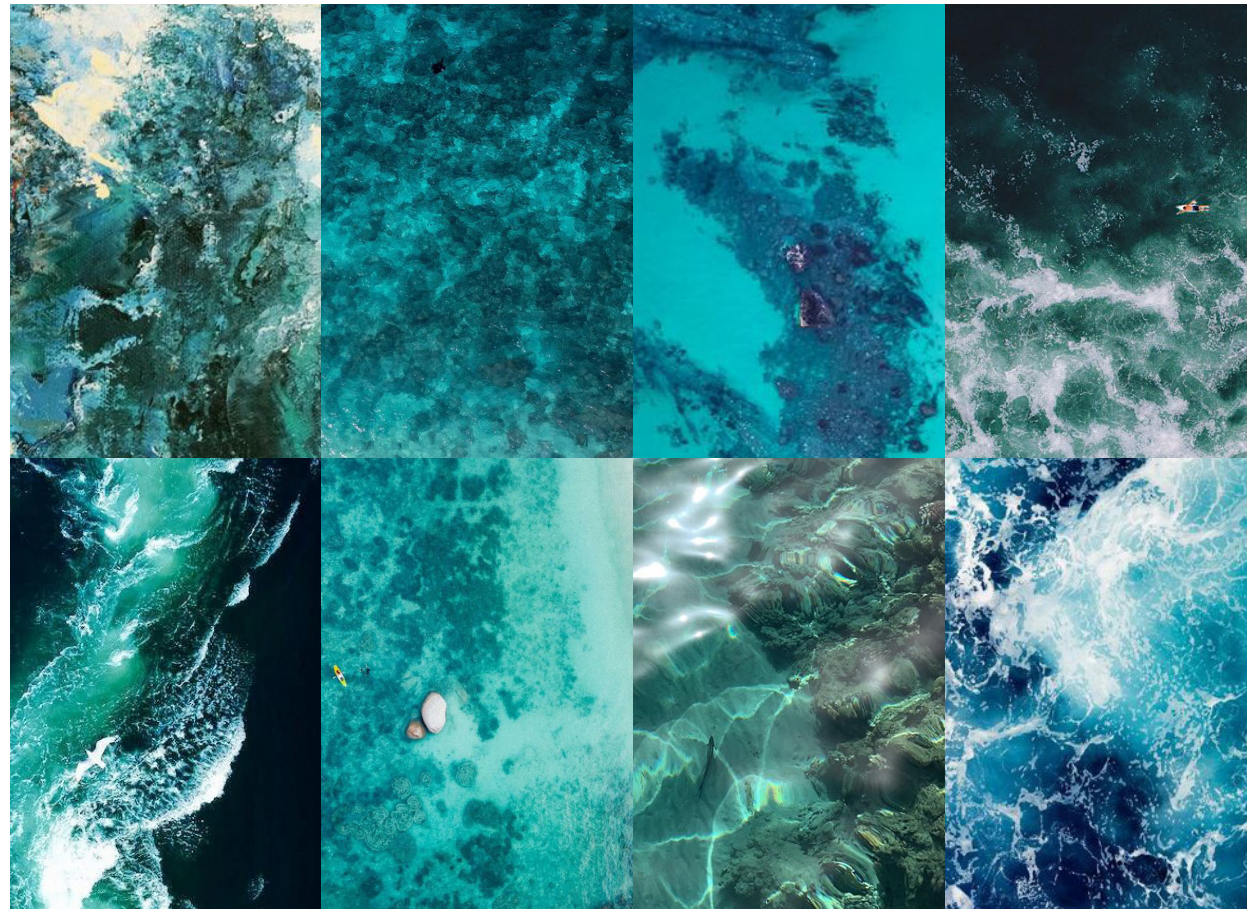
<http://daccessddsny.un.org/doc/UNDOC/GEN/G03/402/32/PDF/G0340232.pdf?openElement>

<http://www.reporteindigo.com/indigonomics/mexico-un-desastre-en-el-agua>

1 0 /
1 0

ANEXOS

anexos



COSTEO DETALLADO POR NIVEL

de tratamiento

DESCRIPCIÓN DE LAS CLAVES DE LOS TRENES DE TRATAMIENTO

Para el análisis técnico económico de los trenes de tratamiento propuestos, se desarrolló un sistema de designación de claves para un ágil manejo de la información.

Los trenes de tratamiento se dividen en: pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario con y sin reactor anaerobio tipo UASB.

En ese sentido, se tienen cuatro trenes para el pretratamiento y tratamiento primario, los cuales se nombran con el número 1 y con las letras A/B/C o D para designar cada una de las 4 opciones (ver Figura 5.2). En la Tabla A1 se muestran las operaciones unitarias que integran cada uno de los trenes de pretratamiento y tratamiento primario con su respectiva nomenclatura. Por ejemplo: la alternativa 1C indica pretratamiento y tratamiento primario con las siguientes operaciones unitarias: rejillas (gruesa + fina) + sedimentador primario + medición de flujo.

Por su parte, los trenes de tratamiento secundario con reactor anaerobio UASB se designaron con el número 2 y una letra A -primera opción general del tratamiento secundario-; además, en este caso, se tienen 5 opciones (ver figura 5.4), por lo que a la letra A le suceden las letras A/B/C/D o E. En la Tabla A3 se presentan las operaciones unitarias que conforman

los trenes de tratamiento secundario con reactor anaerobio con su respectiva nomenclatura. Como ejemplo, opción 2AB: tratamiento secundario con reactor anaerobio, además, las siguientes operaciones integran el tren completo: reactor anaerobio UASB + lodos activados (completamente mezclado) + sedimentador secundario + filtración + desinfección.

Finalmente, se tiene una segunda posibilidad de tratamiento secundario: sin reactor anaerobio. En este caso, posterior al número 2 se tiene una letra B y a continuación, las letras A/B/C o D, ya que para este caso se tienen 4 opciones. En la Tabla A5 se muestran las operaciones unitarias que componen los trenes de tratamiento secundario sin reactor anaerobio con su respectiva nomenclatura. A manera de ejemplo se presenta la alternativa 2BA, la cual se integra de la siguiente forma: laguna anaerobia cubierta + laguna facultativa + laguna de pulimento + filtración + desinfección.

Por otro lado, además, de las alternativas en cuanto a operaciones unitarias, también realizó un análisis económico para varios caudales: 5, 10, 15, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300 y 400. En ese sentido, al caudal le siguen las letras correspondientes al tren de pretratamiento y tratamiento primario o tratamiento secundario analizado.

De acuerdo con las opciones y caudales anteriores,

se forman trenes completos de tratamiento de agua residuales con múltiples combinaciones. De acuerdo con las necesidades específicas, se integraron trenes de tratamiento recomendados con relación al origen del agua residual (municipal, hoteles, industria pecuaria e industria de alta carga), los cuales se designaron de la siguiente forma: la letra R (recomendado) y la opción de pretratamiento y tratamiento primario deseado, a continuación, un guión bajo y la opción de tratamiento secundario con o sin reactor anaerobio. Sin embargo, también se realizó el análisis económico para otros posibles trenes de tratamiento, aunque no sean la opción más viable; en este caso, la letra P (posible) antecede a las opciones de pretratamiento y tratamiento secundario.

Como ejemplo de un tren integrado se tiene la opción: R_1B_2BB, el cual corresponde al tren de tratamiento recomendado para el agua residual de origen hotelero con pretratamiento compuesto por rejillas (gruesa + fina), desgrasador/flotador, tamiz fino, tanque homogeneizador y medición de flujo, así como un tratamiento secundario integrado por lodos activados (aireación extendida), sedimentador secundario, filtración y desinfección.

Nota importante: En las tablas de costos se presentan dos columnas; la primera considera los costos de obra civil y equipamiento y la segunda, además de lo anterior considera el costo de tubería, instalaciones eléctricas e instrumentación (es decir, el costo total).

DESCRIPCIÓN Y COSTEO DE LOS TRENES DE *tratamiento propuestos*

Clave		Operaciones unitarias			
1A	Rejillas gruesa + fina	Desarenador	Medición de flujo		
1B	Rejillas gruesa + fina	Desgrasador/ flotador	Tamiz fino	Homogeneizador/ ecualizador	Medición de flujo
1C	Rejillas gruesa + fina	Sedimentador primario	Medición de flujo		
1D	Rejillas gruesa + fina	Homogeneizador/ ecualizador	Medición de flujo		

TABLA A1. OPERACIONES UNITARIAS QUE CONFORMAN EL PRETRATAMIENTO Y TRATAMIENTO PRIMARIO

Caudal/ Tren	Pretratamiento y tratamiento primario (Costo USD)					Costo (USD) OC y eq.	Costo (USD) tub, elec, inst
5_1A	15,741.96	16,817.45	8,549.03			41,108.45	45,219.29
5_1B	15,741.96	109,571.13	5,497.72	26,819.92	8,549.03	166,179.76	191,106.72
5_1C	15,741.96	85,559.14	8,549.03			109,850.14	123,032.16
5_1D	15,741.96	26,819.92	8,549.03			51,110.91	57,244.22
5_1A	23,620.46	31,144.23	17,208.69			71,973.38	79,170.72
15_1B	23,620.46	131,318.13	10,083.27	55,168.04	17,208.69	237,398.58	273,008.37
15_1C	23,620.46	165,401.40	17,208.69			206,230.55	230,978.22
15_1D	23,620.46	55,168.04	17,208.69			95,997.19	107,516.85
25_1A	31,385.06	41,477.49	23,824.35			96,686.91	106,355.60
25_1B	31,385.06	152,682.86	13,368.54	77,149.17	23,824.35	298,409.99	343,171.48
25_1C	31,385.06	224,723.47	23,824.35			279,932.88	313,524.83
25_1D	31,385.06	77,149.17	23,824.35			132,358.58	148,241.61
50_1A	50,298.25	61,377.31	37,043.92			148,719.48	163,591.43
50_1B	50,298.25	204,417.45	19,601.20	121,606.68	37,043.92	432,967.51	497,912.63
50_1C	50,298.25	340,617.08	37,043.92			427,959.26	479,314.37
50_1D	50,298.25	121,606.68	37,043.92			208,948.86	234,022.72
75_1A	68,499.56	76,283.13	47,956.99			192,739.68	212,013.65
75_1B	68,499.56	253,758.60	24,519.00	158,694.31	47,956.99	553,428.46	636,442.72
75_1C	68,499.56	434,431.37	47,956.99			550,887.93	616,994.48
75_1D	68,499.56	158,694.31	47,956.99			275,150.86	308,168.96

Caudal/ Tren	Pretratamiento y tratamiento primario (Costo USD)					Costo (USD) OC y eq.	Costo (USD) tub, elec, inst
100_1A	85,989.00	90,654.83	57,598.73			234,242.56	257,666.81
100_1B	85,989.00	300,705.30	28,739.64	191,683.02	57,598.73	664,715.68	764,423.04
100_1C	85,989.00	516,278.96	57,598.73			659,866.68	739,050.69
100_1D	85,989.00	191,683.02	57,598.73			335,270.74	375,503.23
150_1A	118,832.25	207,300.65	74,567.19			400,700.09	440,770.10
150_1B	118,832.25	387,418.05	35,950.20	250,142.53	74,567.19	866,910.23	996,946.76
150_1C	118,832.25	658,474.83	74,567.19			851,874.28	954,099.19
150_1D	118,832.25	250,142.53	74,567.19			443,541.98	496,767.02
200_1A	148,828.00	246,355.66	89,558.91			484,742.57	533,216.82
200_1B	148,828.00	464,555.70	42,138.59	302,141.11	89,558.91	1,047,222.31	1,204,305.66
200_1C	148,828.00	782,532.57	89,558.91			1,020,919.48	1,143,429.81
200_1D	148,828.00	302,141.11	89,558.91			540,528.02	605,391.38
300_1A	200,277.00	314,208.04	115,942.78			630,427.82	693,470.60
300_1B	200,277.00	590,104.00	52,710.85	394,288.16	115,942.78	1,353,322.79	1,556,321.20
300_1C	200,277.00	998,061.21	115,942.78			1,314,280.99	1,471,994.71
300_1D	200,277.00	394,288.16	115,942.78			710,507.94	795,768.89
400_1A	240,336.00	400,748.64	139,253.04			780,337.68	858,371.45
400_1B	240,336.00	677,354.00	61,784.38	476,251.13	139,253.04	1,594,978.55	1,834,225.33
400_1C	240,336.00	1,186,097.58	139,253.04			1,565,686.62	1,753,569.01
400_1D	240,336.00	476,251.13	139,253.04			855,840.17	958,540.99

TABLA A2.. OSTOS POR OPERACIÓN UNITARIA
PARA EL PRETRATAMIENTO Y TRATAMIENTO
PRIMARIO

ClaveOperaciones unitarias					
2AA	Reactor anaerobio UASB	Filtración	Desinfección		
2AB	Reactor anaerobio UASB	Lodos activados (Comp. Mezclado)	Sedimentador secundario	Filtración	Desinfección
2AC	Reactor anaerobio UASB	Filtro percolador	Sedimentador secundario	Filtración	Desinfección
2AD	Reactor anaerobio UASB	Humedal artificial	Desinfección		
2AE	Reactor anaerobio UASB	Laguna de pulimento	Desinfección		

TABLA A3. OPERACIONES UNITARIAS QUE CONFORMAN EL TRATAMIENTO SECUNDARIO CON REACTOR ANAEROBIO

Caudal/ Tren	Tratamiento secundario con reactor anaerobio (Costo USD)					Costo (USD) OC y eq.	Costo (USD) tub, elec, inst
5_2AA	61,554.96	10,159.67	8,409.97			80,124.60	102,559.48
5_2AB	61,554.96	46,010.31	200,191.04	10,159.67	8,409.97	326,325.95	424,223.74
5_2AC	61,554.96	111,403.35	124,771.75	10,159.67	8,409.97	316,299.70	392,211.63
5_2AD	61,554.96	377,189.23	8,409.97			447,154.15	514,227.28
5_2AE	61,554.96	234,654.69	8,409.97			304,619.62	359,451.15
15_2AA	122,323.97	26,690.98	21,267.83			170,282.78	217,961.96
15_2AB	122,323.97	104,134.55	299,176.78	26,690.98	21,267.83	573,594.11	745,672.34
15_2AC	122,323.97	197,406.75	218,134.46	26,690.98	21,267.83	585,823.99	726,421.75
15_2AD	122,323.97	743,159.65	21,267.83			886,751.44	1,019,764.16
15_2AE	122,323.97	556,904.26	21,267.83			700,496.05	826,585.34
25_2AA	168,340.73	41,822.89	32,739.68			242,903.30	310,916.22
25_2AB	168,340.73	152,243.72	360,626.78	41,822.89	32,739.68	755,773.80	982,505.94
25_2AC	168,340.73	269,580.30	291,146.72	41,822.89	32,739.68	803,630.31	996,501.59
25_2AD	168,340.73	1,080,328.25	32,739.68			1,281,408.66	1,473,619.96
25_2AE	168,340.73	832,355.68	32,739.68			1,033,436.09	1,219,454.59
50_2AA	259,634.89	76,927.14	58,788.75			395,350.78	506,049.00
50_2AB	259,634.89	254,891.41	464,670.01	76,927.14	58,788.75	1,114,912.20	1,449,385.86
50_2AC	259,634.89	402,655.47	442,921.02	76,927.14	58,788.75	1,240,927.27	1,538,749.82
50_2AD	259,634.89	1,863,062.68	58,788.75			2,181,486.33	2,508,709.28
50_2AE	259,634.89	1,435,916.70	58,788.75			1,754,340.34	2,070,121.60
75_2AA	334,532.03	109,875.03	82,794.85			527,201.91	674,818.44
75_2AB	334,532.03	344,571.25	538,940.99	109,875.03	82,794.85	1,410,714.15	1,833,928.40
75_2AC	334,532.03	524,684.53	532,290.19	109,875.03	82,794.85	1,584,176.62	1,964,379.01
75_2AD	334,532.03	2,591,424.61	82,794.85			3,008,751.48	3,460,064.21
75_2AE	334,532.03	1,975,423.61	82,794.85			2,392,750.48	2,823,445.57
100_2AA	400,439.50	141,496.32	105,563.57			647,499.39	828,799.22
100_2AB	400,439.50	426,747.51	598,730.41	141,496.32	105,563.57	1,672,977.30	2,174,870.49
100_2AC	400,439.50	638,658.80	606,433.51	141,496.32	105,563.57	1,892,591.69	2,346,813.70

Caudal/ Tren	Tratamiento secundario con reactor anaerobio (Costo USD)					Costo (USD) OC y eq.	Costo (USD) tub, elec, inst
100_2AD	400,439.50	3,279,855.84	105,563.57			3,785,858.90	4,353,737.74
100_2AE	400,439.50	2,477,134.25	105,563.57			2,983,137.31	3,520,102.03
150_2AA	515,954.68	202,099.20	148,669.93			866,723.80	1,109,406.47
150_2AB	515,954.68	576,892.44	694,429.06	202,099.20	148,669.93	2,138,045.30	2,779,458.89
150_2AC	515,954.68	842,542.97	728,794.95	202,099.20	148,669.93	2,438,061.72	3,023,196.54
150_2AD	515,954.68	4,559,302.29	148,669.93			5,223,926.89	6,007,515.93
150_2AE	515,954.68	3,407,850.52	148,669.93			4,072,475.13	4,805,520.65
200_2AA	617,604.93	260,261.98	189,554.41			1,067,421.32	1,366,299.30
200_2AB	617,604.93	714,474.60	771,468.12	260,261.98	189,554.41	2,553,364.05	3,319,373.26
200_2AC	617,604.93	1,025,563.83	830,309.65	260,261.98	189,554.41	2,923,294.81	3,624,885.56
200_2AD	617,604.93	5,726,315.95	189,554.41			6,533,475.30	7,513,496.59
200_2AE	617,604.93	4,273,363.55	189,554.41			5,080,522.90	5,995,017.02
300_2AA	795,766.04	371,732.18	266,958.02			1,434,456.24	1,836,103.99
300_2AB	795,766.04	965,852.14	894,776.47	371,732.18	266,958.02	3,295,084.86	4,283,610.31
300_2AC	795,766.04	1,352,962.79	997,843.09	371,732.18	266,958.02	3,785,262.12	4,693,725.03
300_2AD	795,766.04	7,761,646.46	266,958.02			8,824,370.51	10,148,026.09
300_2AE	795,766.04	5,878,964.46	266,958.02			6,941,688.52	8,191,192.46
400_2AA	952,543.04	478,714.19	340,371.92			1,771,629.15	2,267,685.31
400_2AB	952,543.04	1,196,196.69	994,041.81	478,714.19	340,371.92	3,961,867.65	5,150,427.95
400_2AC	952,543.04	1,646,859.29	1,136,833.81	478,714.19	340,371.92	4,555,322.25	5,648,599.59
400_2AD	952,543.04	9,428,826.93	340,371.92			10,721,741.89	12,330,003.18
400_2AE	952,543.04	7,372,081.69	340,371.92			8,664,996.65	10,224,696.05

TABLA A4. COSTOS POR OPERACIÓN UNITARIA PARA EL TRATAMIENTO SECUNDARIO CON REACTOR ANAEROBIO UASB

Clave	Operaciones unitarias				
2BA	Laguna anaerobia cubierta	Laguna facultativa	Laguna de pulimento	Filtración	Desinfección
2BB	Lodos activados (Aer. Ext)	Sedimentador secundario	Filtración	Desinfección	
2BC	Filtro percolador	Lodos activados (Aer. Ext.)	Sedimentador secundario	Filtración	Desinfección
2BD	Lodos activados (Comp. Mezclado)	Sedimentador secundario	Filtración	Desinfección	Digestor anaerobio

TABLA A5. OPERACIONES UNITARIAS QUE CONFORMAN EL TRATAMIENTO SECUNDARIO SIN REACTOR ANAEROBIO

Caudal/ Tren		Tratamiento s/reactor anaerobio (Costo USD)				Costo (USD) OC y eq.	Costo (USD) tub, elec, inst
5_2BA	83,472.36	259,897.69	103,271.10	10,159.67	7,004.57	463,805.39	547,290.36
5_2BB	151,643.61	165,342.53	10,159.67	7,004.57		334,150.38	421,029.48
5_2BC	103,081.04	90,462.81	112,733.54	10,159.67	7,004.57	323,441.63	414,005.28
5_2BD	78,777.11	124,730.92	10,159.67	7,004.57	204,341.59	425,013.86	552,518.01
15_2BA	134,737.84	475,593.65	187,397.77	26,690.98	20,232.14	844,652.38	996,689.81
15_2BB	272,288.35	285,798.61	26,690.98	20,232.14		605,010.09	762,312.71
15_2BC	218,371.39	177,053.57	214,348.96	26,690.98	20,232.14	656,697.04	840,572.21
15_2BD	167,564.63	199,039.76	26,690.98	20,232.14	339,962.65	753,490.17	979,537.22
25_2BA	176,918.59	664,541.83	260,706.83	41,822.89	33,131.17	1,177,121.32	1,389,003.16
25_2BB	357,007.26	385,318.13	41,822.89	33,131.17		817,279.45	1,029,772.11
25_2BC	309,588.62	242,690.61	288,988.60	41,822.89	33,131.17	916,221.89	1,172,764.02
25_2BD	238,008.49	259,744.32	41,822.89	33,131.17	455,743.62	1,028,450.48	1,336,985.63
50_2BA	267,250.17	1,088,900.16	424,605.66	76,927.14	64,696.57	1,922,379.71	2,268,408.06
50_2BB	536,440.34	577,952.16	76,927.14	64,696.57		1,256,016.21	1,582,580.42
50_2BC	497,140.09	373,708.45	433,464.12	76,927.14	64,696.57	1,445,936.37	1,850,798.56
50_2BD	383,177.55	389,100.09	76,927.14	64,696.57	710,019.12	1,623,920.47	2,111,096.62
75_2BA	346,298.32	1,476,050.05	573,447.02	109,875.03	95,696.79	2,601,367.22	3,069,613.32
75_2BB	677,114.13	732,635.01	109,875.03	95,696.79		1,615,320.97	2,035,304.42
75_2BC	655,846.11	482,176.90	549,476.26	109,875.03	95,696.79	1,893,071.10	2,423,131.01
75_2BD	506,261.32	501,853.46	109,875.03	95,696.79	936,799.26	2,150,485.86	2,795,631.62

Caudal/ Tren		Tratamiento s/reactor anaerobio (Costo USD)				Costo (USD) OC y eq.	Costo (USD) tub, elec, inst
100_2BA	418,346.66	1,839,789.20	712,751.51	141,496.32	126,335.60	3,238,719.29	3,821,688.76
100_2BB	817,366.58	866,890.68	141,496.32	126,335.60		1,952,089.18	2,459,632.37
100_2BC	798,311.87	578,404.74	650,168.01	141,496.32	126,335.60	2,294,716.55	2,937,237.18
100_2BD	616,889.90	604,359.63	141,496.32	126,335.60	1,145,874.98	2,634,956.43	3,425,443.36
150_2BA	547,512.77	2,517,660.09	970,963.09	202,099.20	186,870.97	4,425,106.13	5,221,625.23
150_2BB	1,069,732.04	1,098,904.91	202,099.20	186,870.97		2,557,607.12	3,222,584.98
150_2BC	1,053,163.37	748,825.43	824,178.68	202,099.20	186,870.97	3,015,137.65	3,859,376.19
150_2BD	815,046.44	787,579.97	202,099.20	186,870.97	1,525,254.00	3,516,850.58	4,571,905.76
200_2BA	661,190.59	3,145,037.84	1,208,187.56	260,261.98	246,700.59	5,521,378.57	6,515,226.71
200_2BB	1,328,319.04	1,300,279.69	260,261.98	246,700.59		3,135,561.30	3,950,807.24
200_2BC	1,281,936.12	900,612.68	975,209.77	260,261.98	246,700.59	3,664,721.14	4,690,843.06
200_2BD	993,150.96	948,230.95	260,261.98	246,700.59	1,863,649.25	4,311,993.74	5,605,591.86
300_2BA	851,208.24	4,281,984.38	1,632,986.09	371,732.18	364,910.45	7,502,821.34	8,853,329.18
300_2BB	1,754,999.88	1,648,285.96	371,732.18	364,910.45		4,139,928.47	5,216,309.88
300_2BC	1,691,178.86	1,170,600.49	1,236,214.47	371,732.18	364,910.45	4,834,636.45	6,188,334.65
300_2BD	1,312,169.57	1,215,160.48	371,732.18	364,910.45	2,440,181.16	5,704,153.85	7,415,400.00
400_2BA	998,087.80	5,287,401.30	2,001,647.58	478,714.19	481,742.16	9,247,593.03	10,912,159.77
400_2BB	2,138,503.69	1,950,335.05	478,714.19	481,742.16		5,049,295.08	6,362,111.80
400_2BC	2,058,544.12	1,412,150.63	1,462,751.29	478,714.19	481,742.16	5,893,902.38	7,544,195.04
400_2BD	1,598,905.79	1,419,259.15	478,714.19	481,742.16	2,899,986.67	6,878,607.96	8,942,190.35

TABLA A6. COSTOS POR OPERACIÓN UNITARIA PARA EL TRATAMIENTO SECUNDARIO SIN REACTOR ANAEROBIO UASB

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Municipal	R_1A_2AA Desaren. +UASB	5	\$147,778.78	\$192,112.41	\$1.41	\$0.07	\$11,093.40
Municipal		15	\$297,132.67	\$386,272.47	\$1.08	\$0.05	\$25,482.70
Municipal		25	\$417,271.82	\$542,453.36	\$0.95	\$0.05	\$37,513.27
Municipal		50	\$669,640.43	\$870,532.56	\$0.80	\$0.04	\$63,396.40
Municipal		75	\$886,832.09	\$1,152,881.71	\$0.73	\$0.04	\$86,171.91
Municipal		100	\$1,086,466.03	\$1,412,405.84	\$0.68	\$0.03	\$107,138.20
Municipal		150	\$1,550,176.57	\$2,015,229.54	\$0.62	\$0.03	\$145,628.18
Municipal		200	\$1,899,516.12	\$2,469,370.96	\$0.57	\$0.03	\$181,060.63
Municipal		300	\$2,529,574.59	\$3,288,446.97	\$0.52	\$0.03	\$246,107.65
Municipal		400	\$3,126,056.76	\$4,063,873.79	\$0.49	\$0.02	\$305,987.54
Municipal	R_1A_2AC Desaren. +UASB. + FP	5	\$437,430.92	\$568,660.20	\$2.75	\$0.14	\$21,709.86
Municipal		15	\$805,592.46	\$1,047,270.20	\$1.92	\$0.10	\$45,324.01
Municipal		25	\$1,102,857.19	\$1,433,714.34	\$1.62	\$0.08	\$63,821.49
Municipal		50	\$1,702,341.25	\$2,213,043.63	\$1.29	\$0.06	\$101,544.65
Municipal		75	\$2,176,392.66	\$2,829,310.46	\$1.13	\$0.06	\$133,241.09
Municipal		100	\$2,604,480.52	\$3,385,824.67	\$1.02	\$0.05	\$161,564.94
Municipal		150	\$3,463,966.64	\$4,503,156.63	\$0.90	\$0.04	\$211,996.30
Municipal		200	\$4,158,102.38	\$5,405,533.10	\$0.82	\$0.04	\$257,061.62
Municipal		300	\$5,387,195.64	\$7,003,354.33	\$0.71	\$0.04	\$337,301.58
Municipal		400	\$6,506,971.03	\$8,459,062.34	\$0.65	\$0.03	\$409,003.79

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Municipal	R_1A_2AD Desaren. +UASB. +Humedal	5	\$559,446.57	\$727,280.54	\$1.39	\$0.07	\$10,972.84
Municipal		15	\$1,098,934.87	\$1,428,615.33	\$1.05	\$0.05	\$24,848.33
Municipal		25	\$1,579,975.55	\$2,053,968.22	\$0.92	\$0.05	\$36,337.30
Municipal		50	\$2,672,300.71	\$3,473,990.92	\$0.77	\$0.04	\$60,858.19
Municipal		75	\$3,672,077.85	\$4,773,701.21	\$0.70	\$0.03	\$82,286.94
Municipal		100	\$4,611,404.55	\$5,994,825.92	\$0.65	\$0.03	\$101,926.08
Municipal		150	\$6,448,286.03	\$8,382,771.83	\$0.58	\$0.03	\$137,815.24
Municipal		200	\$8,046,713.42	\$10,460,727.44	\$0.54	\$0.03	\$170,707.13
Municipal		300	\$10,841,496.70	\$14,093,945.70	\$0.49	\$0.02	\$230,814.75
Municipal		400	\$13,188,374.62	\$17,144,887.01	\$0.45	\$0.02	\$285,902.51
Municipal	R_1A_2AE Desaren. +UASB. +L.Pulim	5	\$404,670.45	\$526,071.58	\$1.35	\$0.07	\$10,653.71
Municipal		15	\$905,756.05	\$1,177,482.87	\$1.01	\$0.05	\$23,940.84
Municipal		25	\$1,325,810.18	\$1,723,553.24	\$0.88	\$0.04	\$34,885.25
Municipal		50	\$2,233,713.04	\$2,903,826.95	\$0.74	\$0.04	\$58,143.47
Municipal		75	\$3,035,459.22	\$3,946,096.98	\$0.66	\$0.03	\$78,393.52
Municipal		100	\$3,777,768.85	\$4,911,099.50	\$0.61	\$0.03	\$96,908.09
Municipal		150	\$5,246,290.75	\$6,820,177.98	\$0.55	\$0.03	\$130,658.99
Municipal		200	\$6,528,233.84	\$8,486,704.00	\$0.51	\$0.03	\$161,517.34
Municipal		300	\$8,884,663.06	\$11,550,061.98	\$0.46	\$0.02	\$217,770.18
Municipal		400	\$11,083,067.50	\$14,407,987.75	\$0.43	\$0.02	\$269,201.98

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Municipal	P_1A_2BA Desaren. +Lagunas	5	\$592,509.65	\$770,262.55	\$1.02	\$0.05	\$8,027.63
Municipal		15	\$1,075,860.53	\$1,398,618.69	\$0.79	\$0.04	\$18,787.94
Municipal		25	\$1,495,358.76	\$1,943,966.39	\$0.71	\$0.04	\$27,899.10
Municipal		50	\$2,431,999.49	\$3,161,599.33	\$0.61	\$0.03	\$47,707.58
Municipal		75	\$3,281,626.97	\$4,266,115.05	\$0.55	\$0.03	\$65,295.31
Municipal		100	\$4,079,355.58	\$5,303,162.25	\$0.52	\$0.03	\$81,580.17
Municipal		150	\$5,662,395.33	\$7,361,113.93	\$0.47	\$0.02	\$111,655.27
Municipal		200	\$7,048,443.53	\$9,162,976.59	\$0.44	\$0.02	\$139,502.44
Municipal		300	\$9,546,799.78	\$12,410,839.72	\$0.40	\$0.02	\$190,931.00
Municipal		400	\$11,770,531.22	\$15,301,690.59	\$0.38	\$0.02	\$238,549.78
Municipal	R_1A_2BD Desaren +LA.Cmez +Dig.Anae	5	\$597,737.31	\$777,058.50	\$4.50	\$0.23	\$35,507.13
Municipal		15	\$1,058,707.94	\$1,376,320.32	\$3.04	\$0.15	\$71,804.27
Municipal		25	\$1,443,341.23	\$1,876,343.59	\$2.55	\$0.13	\$100,324.56
Municipal		50	\$2,274,688.05	\$2,957,094.46	\$1.98	\$0.10	\$156,447.08
Municipal		75	\$3,007,645.27	\$3,909,938.85	\$1.72	\$0.09	\$202,881.28
Municipal		100	\$3,683,110.17	\$4,788,043.22	\$1.55	\$0.08	\$243,965.10
Municipal		150	\$5,012,675.85	\$6,516,478.61	\$1.34	\$0.07	\$316,375.03
Municipal		200	\$6,138,808.68	\$7,980,451.29	\$1.21	\$0.06	\$380,441.53
Municipal		300	\$8,108,870.61	\$10,541,531.79	\$1.04	\$0.05	\$493,358.28
Municipal		400	\$9,800,561.80	\$12,740,730.33	\$0.94	\$0.05	\$593,264.21

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Hoteles	R_1B_2BB Desgras +LA.AExt	5	\$612,136.20	\$795,777.06	\$6.41	\$0.32	\$50,502.60
Hoteles		15	\$1,035,321.08	\$1,345,917.40	\$4.15	\$0.21	\$98,060.70
Hoteles		25	\$1,372,943.59	\$1,784,826.67	\$3.39	\$0.17	\$133,506.50
Hoteles		50	\$2,080,493.06	\$2,704,640.98	\$2.57	\$0.13	\$202,919.84
Hoteles		75	\$2,671,747.14	\$3,473,271.29	\$2.19	\$0.11	\$259,229.03
Hoteles		100	\$3,224,055.41	\$4,191,272.03	\$1.96	\$0.10	\$308,422.91
Hoteles		150	\$4,219,531.74	\$5,485,391.26	\$1.67	\$0.08	\$394,008.64
Hoteles		200	\$5,155,112.90	\$6,701,646.77	\$1.49	\$0.07	\$468,779.65
Hoteles		300	\$6,772,631.08	\$8,804,420.40	\$1.27	\$0.06	\$598,863.53
Hoteles		400	\$8,196,337.13	\$10,655,238.27	\$1.13	\$0.06	\$712,509.84
Ind. Pecuaria	R_1C_2AC Sed.Prim +UASB +FP	5	\$515,243.78	\$669,816.92	\$2.93	\$0.15	\$23,099.43
Ind. Pecuaria		15	\$957,399.97	\$1,244,619.96	\$2.04	\$0.10	\$48,172.07
Ind. Pecuaria		25	\$1,310,026.42	\$1,703,034.34	\$1.72	\$0.09	\$67,797.26
Ind. Pecuaria		50	\$2,018,064.19	\$2,623,483.45	\$1.37	\$0.07	\$107,795.65
Ind. Pecuaria		75	\$2,581,373.49	\$3,355,785.54	\$1.20	\$0.06	\$141,385.96
Ind. Pecuaria		100	\$3,085,864.39	\$4,011,623.70	\$1.09	\$0.05	\$171,391.90
Ind. Pecuaria		150	\$3,977,295.72	\$5,170,484.44	\$0.95	\$0.05	\$224,799.50
Ind. Pecuaria		200	\$4,768,315.37	\$6,198,809.99	\$0.86	\$0.04	\$272,508.06
Ind. Pecuaria		300	\$6,165,719.74	\$8,015,435.66	\$0.76	\$0.04	\$357,424.57
Ind. Pecuaria		400	\$7,402,168.60	\$9,622,819.18	\$0.69	\$0.03	\$433,279.78

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Ind. Pecuaria	R_1C_2AD Sed.Prim +UASB +Humedal	5	\$637,259.43	\$828,437.26	\$1.49	\$0.07	\$11,778.09
Ind. Pecuaria		15	\$1,250,742.37	\$1,625,965.09	\$1.10	\$0.06	\$26,092.20
Ind. Pecuaria		25	\$1,787,144.79	\$2,323,288.22	\$0.96	\$0.05	\$37,768.46
Ind. Pecuaria		50	\$2,988,023.65	\$3,884,430.74	\$0.79	\$0.04	\$62,384.25
Ind. Pecuaria		75	\$4,077,058.68	\$5,300,176.29	\$0.71	\$0.04	\$83,669.09
Ind. Pecuaria		100	\$5,092,788.42	\$6,620,624.95	\$0.65	\$0.03	\$103,043.52
Ind. Pecuaria		150	\$6,961,615.12	\$9,050,099.65	\$0.58	\$0.03	\$138,200.86
Ind. Pecuaria		200	\$8,656,926.41	\$11,254,004.33	\$0.54	\$0.03	\$170,202.68
Ind. Pecuaria		300	\$11,620,020.80	\$15,106,027.04	\$0.48	\$0.02	\$228,274.01
Ind. Pecuaria		400	\$14,083,572.19	\$18,308,643.85	\$0.45	\$0.02	\$281,133.19

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Ind. Pecuaria	R_1C_2AE Sed.Prim. +UASB. +L.Pulim	5	\$550,557.87	\$715,725.24	\$1.41	\$0.07	\$11,130.40
Ind. Pecuaria		15	\$1,057,563.56	\$1,374,832.62	\$1.05	\$0.05	\$24,738.76
Ind. Pecuaria		25	\$1,532,979.41	\$1,992,873.24	\$0.91	\$0.05	\$35,864.26
Ind. Pecuaria		50	\$2,549,435.97	\$3,314,266.77	\$0.75	\$0.04	\$59,362.30
Ind. Pecuaria		75	\$3,440,440.05	\$4,472,572.06	\$0.67	\$0.03	\$79,712.98
Ind. Pecuaria		100	\$4,259,152.72	\$5,536,898.53	\$0.62	\$0.03	\$98,256.10
Ind. Pecuaria		150	\$5,759,619.84	\$7,487,505.79	\$0.56	\$0.03	\$131,940.42
Ind. Pecuaria		200	\$7,138,446.83	\$9,279,980.88	\$0.52	\$0.03	\$162,632.87
Ind. Pecuaria		300	\$9,663,187.16	\$12,562,143.31	\$0.46	\$0.02	\$218,386.94
Ind. Pecuaria		400	\$11,978,265.06	\$15,571,744.58	\$0.43	\$0.02	\$269,188.89

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Ind. Pecuaria	R_1C_2BA Sed.Prim+. Lagunas	5	\$670,322.51	\$871,419.27	\$1.25	\$0.06	\$9,821.67
Ind. Pecuaria		15	\$1,227,668.03	\$1,595,968.44	\$0.92	\$0.05	\$21,734.22
Ind. Pecuaria		25	\$1,702,527.99	\$2,213,286.39	\$0.80	\$0.04	\$31,444.22
Ind. Pecuaria		50	\$2,747,722.43	\$3,572,039.15	\$0.66	\$0.03	\$51,902.17
Ind. Pecuaria		75	\$3,686,607.79	\$4,792,590.13	\$0.59	\$0.03	\$69,582.41
Ind. Pecuaria		100	\$4,560,739.45	\$5,928,961.29	\$0.54	\$0.03	\$85,670.28
Ind. Pecuaria		150	\$6,175,724.42	\$8,028,441.74	\$0.49	\$0.02	\$114,853.48
Ind. Pecuaria		200	\$7,658,656.52	\$9,956,253.48	\$0.45	\$0.02	\$141,408.29
Ind. Pecuaria		300	\$10,325,323.89	\$13,422,921.05	\$0.40	\$0.02	\$189,578.39
Ind. Pecuaria		400	\$12,665,728.79	\$16,465,447.42	\$0.37	\$0.02	\$233,410.05

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Ind. Alta carga	R_1D_2AB Homog. +UASB. + LA.Cmez	5	\$481,467.96	\$625,908.35	\$4.10	\$0.21	\$32,339.99
Ind. Alta carga		15	\$853,189.20	\$1,109,145.96	\$2.88	\$0.14	\$68,112.70
Ind. Alta carga		25	\$1,130,747.55	\$1,469,971.81	\$2.44	\$0.12	\$96,303.38
Ind. Alta carga		50	\$1,683,408.58	\$2,188,431.15	\$1.95	\$0.10	\$154,077.74
Ind. Alta carga		75	\$2,142,097.36	\$2,784,726.57	\$1.72	\$0.09	\$202,828.86
Ind. Alta carga		100	\$2,550,373.73	\$3,315,485.84	\$1.56	\$0.08	\$246,512.09
Ind. Alta carga		150	\$3,276,225.91	\$4,259,093.68	\$1.37	\$0.07	\$324,510.01
Ind. Alta carga		200	\$3,924,764.64	\$5,102,194.04	\$1.25	\$0.06	\$394,399.69
Ind. Alta carga		300	\$5,079,379.20	\$6,603,192.96	\$1.10	\$0.05	\$519,190.14
Ind. Alta carga		400	\$6,108,968.94	\$7,941,659.62	\$1.00	\$0.05	\$631,008.05

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Ind. Alta carga	R_ID_2AC Homog. +UASB. +. FP	5	\$449,455.85	\$584,292.61	\$3.41	\$0.17	\$26,879.71
Ind. Alta carga		15	\$833,938.60	\$1,084,120.18	\$2.41	\$0.12	\$56,986.96
Ind. Alta carga		25	\$1,144,743.20	\$1,488,166.16	\$2.05	\$0.10	\$80,820.21
Ind. Alta carga		50	\$1,772,772.54	\$2,304,604.30	\$1.65	\$0.08	\$129,844.79
Ind. Alta carga		75	\$2,272,547.98	\$2,954,312.37	\$1.45	\$0.07	\$171,344.80
Ind. Alta carga		100	\$2,722,316.93	\$3,539,012.01	\$1.32	\$0.07	\$208,607.07
Ind. Alta carga		150	\$3,519,963.55	\$4,575,952.62	\$1.16	\$0.06	\$275,280.50
Ind. Alta carga		200	\$4,230,276.94	\$5,499,360.03	\$1.06	\$0.05	\$335,145.62
Ind. Alta carga		300	\$5,489,493.92	\$7,136,342.10	\$0.93	\$0.05	\$442,262.35
Ind. Alta carga		400	\$6,607,140.58	\$8,589,282.75	\$0.85	\$0.04	\$538,440.93

TABLA A7. COSTOS ESTIMADOS DE INVERSIÓN Y OPERACIÓN PARA TRENES DE TRATAMIENTO INTEGRADOS RECOMENDADOS

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Municipal	P_1A_2AB Desaren +UASB. +LACMez	5	\$469,443.03	\$610,275.94	\$3.85	\$0.19	\$30,364.71
Municipal		15	\$824,843.06	\$1,072,295.98	\$2.65	\$0.13	\$62,769.16
Municipal		25	\$1,088,861.53	\$1,415,519.99	\$2.23	\$0.11	\$87,980.89
Municipal		50	\$1,612,977.29	\$2,096,870.48	\$1.76	\$0.09	\$139,113.47
Municipal		75	\$2,045,942.05	\$2,659,724.66	\$1.54	\$0.08	\$181,871.86
Municipal		100	\$2,432,537.31	\$3,162,298.50	\$1.39	\$0.07	\$219,963.19
Municipal		150	\$3,220,228.99	\$4,186,297.69	\$1.22	\$0.06	\$287,571.83
Municipal		200	\$3,852,590.08	\$5,008,367.11	\$1.10	\$0.06	\$347,801.01
Municipal		300	\$4,977,080.92	\$6,470,205.19	\$0.96	\$0.05	\$454,702.32
Municipal		400	\$6,008,799.40	\$7,811,439.22	\$0.87	\$0.04	\$549,935.39
Hoteles	P_1B_2AB Desgras +UASB +LACMez	5	\$615,330.46	\$799,929.60	\$4.29	\$0.21	\$33,852.25
Hoteles		15	\$1,018,680.72	\$1,324,284.93	\$2.97	\$0.15	\$70,286.69
Hoteles		25	\$1,325,677.42	\$1,723,380.65	\$2.50	\$0.13	\$98,726.11
Hoteles		50	\$1,947,298.49	\$2,531,488.04	\$1.99	\$0.10	\$156,536.99
Hoteles		75	\$2,470,371.12	\$3,211,482.46	\$1.73	\$0.09	\$204,982.91
Hoteles		100	\$2,939,293.53	\$3,821,081.59	\$1.57	\$0.08	\$248,200.08
Hoteles		150	\$3,776,405.65	\$4,909,327.35	\$1.37	\$0.07	\$325,014.40
Hoteles		200	\$4,523,678.92	\$5,880,782.59	\$1.25	\$0.06	\$393,538.17
Hoteles		300	\$5,839,931.52	\$7,591,910.97	\$1.09	\$0.05	\$515,332.52
Hoteles		400	\$6,984,653.28	\$9,080,049.26	\$0.99	\$0.05	\$623,981.64

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Hoteles	P_1B_2AC Desgras +UASB. +FP	5	\$583,318.35	\$758,313.86	\$3.93	\$0.20	\$30,993.83
Hoteles		15	\$999,430.12	\$1,299,259.16	\$2.71	\$0.14	\$64,210.60
Hoteles		25	\$1,339,673.07	\$1,741,574.99	\$2.29	\$0.11	\$90,093.29
Hoteles		50	\$2,036,662.45	\$2,647,661.19	\$1.81	\$0.09	\$142,651.16
Hoteles		75	\$2,600,821.74	\$3,381,068.26	\$1.58	\$0.08	\$186,648.21
Hoteles		100	\$3,111,236.74	\$4,044,607.76	\$1.43	\$0.07	\$225,869.82
Hoteles		150	\$4,020,143.30	\$5,226,186.29	\$1.25	\$0.06	\$295,533.49
Hoteles		200	\$4,829,191.22	\$6,277,948.59	\$1.13	\$0.06	\$357,635.88
Hoteles		300	\$6,250,046.24	\$8,125,060.11	\$0.99	\$0.05	\$467,939.38
Hoteles		400	\$7,482,824.92	\$9,727,672.39	\$0.90	\$0.04	\$566,270.55
Hoteles	P_1B_2AD Desgras. +UASB +Humedal	5	\$705,334.00	\$916,934.20	\$1.84	\$0.09	\$14,521.12
Hoteles		15	\$1,292,772.53	\$1,680,604.29	\$1.37	\$0.07	\$32,381.62
Hoteles		25	\$1,816,791.44	\$2,361,828.87	\$1.19	\$0.06	\$47,016.28
Hoteles		50	\$3,006,621.91	\$3,908,608.48	\$0.99	\$0.05	\$77,983.03
Hoteles		75	\$4,096,506.93	\$5,325,459.01	\$0.89	\$0.04	\$104,844.76
Hoteles		100	\$5,118,160.78	\$6,653,609.01	\$0.82	\$0.04	\$129,345.71
Hoteles		150	\$7,004,462.69	\$9,105,801.50	\$0.74	\$0.04	\$173,899.62
Hoteles		200	\$8,717,802.25	\$11,333,142.93	\$0.68	\$0.03	\$214,537.84
Hoteles		300	\$11,704,347.29	\$15,215,651.48	\$0.61	\$0.03	\$288,436.71
Hoteles		400	\$14,164,228.50	\$18,413,497.06	\$0.56	\$0.03	\$355,840.85

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Hoteles	P_1B_2AE Desgras +UASB +L.Pulim	5	\$550,557.87	\$715,725.24	\$1.76	\$0.09	\$13,890.61
Hoteles		15	\$1,099,593.71	\$1,429,471.82	\$1.31	\$0.07	\$30,975.61
Hoteles		25	\$1,562,626.07	\$2,031,413.89	\$1.14	\$0.06	\$44,974.82
Hoteles		50	\$2,568,034.24	\$3,338,444.51	\$0.95	\$0.05	\$74,597.00
Hoteles		75	\$3,459,888.29	\$4,497,854.78	\$0.85	\$0.04	\$100,292.38
Hoteles		100	\$4,284,525.07	\$5,569,882.59	\$0.78	\$0.04	\$123,729.49
Hoteles		150	\$5,802,467.42	\$7,543,207.64	\$0.70	\$0.04	\$166,348.87
Hoteles		200	\$7,199,322.68	\$9,359,119.48	\$0.65	\$0.03	\$205,222.57
Hoteles		300	\$9,747,513.66	\$12,671,767.76	\$0.58	\$0.03	\$275,912.73
Hoteles		400	\$12,058,921.38	\$15,676,597.79	\$0.54	\$0.03	\$340,390.18
Hoteles	P_1B_2BC Desgras. +FP +LA. AExt	5	\$605,112.01	\$786,645.61	\$4.76	\$0.24	\$37,508.40
Hoteles		15	\$1,113,580.59	\$1,447,654.76	\$3.28	\$0.16	\$77,621.63
Hoteles		25	\$1,515,935.51	\$1,970,716.16	\$2.76	\$0.14	\$108,854.56
Hoteles		50	\$2,348,711.19	\$3,053,324.55	\$2.18	\$0.11	\$172,237.81
Hoteles		75	\$3,059,573.73	\$3,977,445.85	\$1.90	\$0.10	\$225,268.73
Hoteles		100	\$3,701,660.22	\$4,812,158.28	\$1.73	\$0.09	\$272,527.51
Hoteles		150	\$4,856,322.96	\$6,313,219.85	\$1.51	\$0.08	\$356,436.99
Hoteles		200	\$5,895,148.72	\$7,663,693.34	\$1.37	\$0.07	\$431,213.36
Hoteles		300	\$7,744,655.86	\$10,068,052.61	\$1.19	\$0.06	\$563,981.20
Hoteles		400	\$9,378,420.37	\$12,191,946.48	\$1.08	\$0.05	\$682,297.95

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Ind. Pecuaria	P_1C_2AB Sed.Prim +UASB. +LA.CMez	5	\$547,255.89	\$711,432.66	\$4.24	\$0.21	\$33,455.33
Ind. Pecuaria		15	\$976,650.56	\$1,269,645.73	\$2.94	\$0.15	\$69,615.39
Ind. Pecuaria		25	\$1,296,030.76	\$1,684,839.99	\$2.48	\$0.12	\$97,876.48
Ind. Pecuaria		50	\$1,928,700.23	\$2,507,310.30	\$1.97	\$0.10	\$155,405.14
Ind. Pecuaria		75	\$2,450,922.87	\$3,186,199.74	\$1.72	\$0.09	\$203,665.86
Ind. Pecuaria		100	\$2,913,921.18	\$3,788,097.53	\$1.56	\$0.08	\$246,747.28
Ind. Pecuaria		150	\$3,733,558.08	\$4,853,625.50	\$1.37	\$0.07	\$323,374.11
Ind. Pecuaria		200	\$4,462,803.07	\$5,801,643.99	\$1.24	\$0.06	\$391,777.40
Ind. Pecuaria		300	\$5,755,605.02	\$7,482,286.53	\$1.09	\$0.05	\$513,443.01
Ind. Pecuaria		400	\$6,903,996.96	\$8,975,196.05	\$0.99	\$0.05	\$622,051.56

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Ind. Pecuaria	P_1C_2BC Sed.Prim +FP +LA. AExt	5	\$537,037.44	\$698,148.67	\$4.47	\$0.22	\$35,226.20
Ind. Pecuaria		15	\$1,071,550.43	\$1,393,015.56	\$3.09	\$0.15	\$72,978.89
Ind. Pecuaria		25	\$1,486,288.85	\$1,932,175.51	\$2.60	\$0.13	\$102,395.99
Ind. Pecuaria		50	\$2,330,112.93	\$3,029,146.81	\$2.06	\$0.10	\$162,130.92
Ind. Pecuaria		75	\$3,040,125.48	\$3,952,163.13	\$1.79	\$0.09	\$212,135.99
Ind. Pecuaria		100	\$3,676,287.87	\$4,779,174.23	\$1.63	\$0.08	\$256,713.52
Ind. Pecuaria		150	\$4,813,475.38	\$6,257,518.00	\$1.42	\$0.07	\$335,890.13
Ind. Pecuaria		200	\$5,834,272.88	\$7,584,554.74	\$1.29	\$0.06	\$406,472.93
Ind. Pecuaria		300	\$7,660,329.36	\$9,958,428.17	\$1.12	\$0.06	\$531,838.94
Ind. Pecuaria		400	\$9,297,764.06	\$12,087,093.27	\$1.02	\$0.05	\$643,597.74

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Ind. Alta carga	P_1D_2AD Homog +UASB +Humedal	5	\$571,471.50	\$742,912.95	\$1.67	\$0.08	\$13,191.21
Ind. Alta carga		15	\$1,127,281.01	\$1,465,465.31	\$1.19	\$0.06	\$28,089.50
Ind. Alta carga		25	\$1,621,861.57	\$2,108,420.04	\$1.01	\$0.05	\$39,918.66
Ind. Alta carga		50	\$2,742,732.00	\$3,565,551.60	\$0.82	\$0.04	\$64,310.90
Ind. Alta carga		75	\$3,768,233.17	\$4,898,703.12	\$0.72	\$0.04	\$85,003.22
Ind. Alta carga		100	\$4,729,240.97	\$6,148,013.26	\$0.66	\$0.03	\$103,607.98
Ind. Alta carga		150	\$6,504,282.94	\$8,455,567.83	\$0.58	\$0.03	\$136,944.31
Ind. Alta carga		200	\$8,118,887.98	\$10,554,554.37	\$0.53	\$0.03	\$166,917.49
Ind. Alta carga		300	\$10,943,794.98	\$14,226,933.48	\$0.47	\$0.02	\$220,623.94
Ind. Alta carga		400	\$13,288,544.17	\$17,275,107.41	\$0.43	\$0.02	\$268,912.18

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Ind. Alta carga	P_1D_2AE Homog +UASB +L.Pulim	5	\$416,695.37	\$541,703.99	\$1.58	\$0.08	\$12,431.73
Ind. Alta carga		15	\$934,102.19	\$1,214,332.85	\$1.13	\$0.06	\$26,823.56
Ind. Alta carga		25	\$1,367,696.20	\$1,778,005.06	\$0.97	\$0.05	\$38,353.99
Ind. Alta carga		50	\$2,304,144.32	\$2,995,387.62	\$0.79	\$0.04	\$62,306.23
Ind. Alta carga		75	\$3,131,614.53	\$4,071,098.89	\$0.70	\$0.03	\$82,755.22
Ind. Alta carga		100	\$3,895,605.26	\$5,064,286.84	\$0.64	\$0.03	\$101,216.78
Ind. Alta carga		150	\$5,302,287.67	\$6,892,973.97	\$0.57	\$0.03	\$134,436.25
Ind. Alta carga		200	\$6,600,408.40	\$8,580,530.92	\$0.52	\$0.03	\$164,427.14
Ind. Alta carga		300	\$8,986,961.35	\$11,683,049.75	\$0.46	\$0.02	\$218,392.33
Ind. Alta carga		400	\$11,183,237.04	\$14,538,208.15	\$0.42	\$0.02	\$267,112.67

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Ind. Alta carga	P_ID_2BA Homog +Lagunas	5	\$604,534.58	\$785,894.95	\$1.42	\$0.07	\$11,178.66
Ind. Alta carga		15	\$1,104,206.67	\$1,435,468.67	\$1.01	\$0.05	\$23,777.81
Ind. Alta carga		25	\$1,537,244.77	\$1,998,418.21	\$0.86	\$0.04	\$33,773.96
Ind. Alta carga		50	\$2,502,430.78	\$3,253,160.01	\$0.69	\$0.03	\$54,373.78
Ind. Alta carga		75	\$3,377,782.28	\$4,391,116.96	\$0.61	\$0.03	\$71,839.66
Ind. Alta carga		100	\$4,197,192.00	\$5,456,349.59	\$0.56	\$0.03	\$87,538.11
Ind. Alta carga		150	\$5,718,392.24	\$7,433,909.92	\$0.49	\$0.02	\$115,656.98
Ind. Alta carga		200	\$7,120,618.09	\$9,256,803.52	\$0.45	\$0.02	\$140,930.43
Ind. Alta carga		300	\$9,649,098.07	\$12,543,827.49	\$0.39	\$0.02	\$186,199.91
Ind. Alta carga		400	\$11,870,700.76	\$15,431,910.99	\$0.36	\$0.02	\$226,888.45

Origen del agua	Tren de tratamiento	Caudal (L/s)	Costos de inversión. Construcción (USD)	Costos de inversión. Tot. (Adm.+Ing.) (USD)	Costos operativos (MXP/m3)	Costos operativos (USD/m3)	Costos op.anuales (USD/año)
Ind. Alta carga	P_ID_2BC Homog +FP +LA. Aext	5	\$471,249.51	\$612,624.36	\$4.67	\$0.23	\$36,854.71
Ind. Alta carga		15	\$948,089.07	\$1,232,515.79	\$3.23	\$0.16	\$76,352.70
Ind. Alta carga		25	\$1,321,005.64	\$1,717,307.33	\$2.72	\$0.14	\$107,129.75
Ind. Alta carga		50	\$2,084,821.28	\$2,710,267.66	\$2.15	\$0.11	\$169,626.22
Ind. Alta carga		75	\$2,731,299.97	\$3,550,689.96	\$1.88	\$0.09	\$221,943.02
Ind. Alta carga		100	\$3,312,740.41	\$4,306,562.54	\$1.70	\$0.09	\$268,581.36
Ind. Alta carga		150	\$4,356,143.21	\$5,662,986.17	\$1.49	\$0.07	\$351,418.30
Ind. Alta carga		200	\$5,296,234.45	\$6,885,104.78	\$1.35	\$0.07	\$425,264.14
Ind. Alta carga		300	\$6,984,103.54	\$9,079,334.61	\$1.18	\$0.06	\$556,425.81
Ind. Alta carga		400	\$8,502,736.03	\$11,053,556.84	\$1.07	\$0.05	\$673,351.21

TABLA A8. COSTOS ESTIMADOS DE INVERSIÓN Y OPERACIÓN PARA TRENES DE TRATAMIENTO INTEGRADOS CON POSIBLE USO

CARACTERÍSTICAS DE LAS PTAR EXISTENTES

en la península de Yucatán

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Capa- cidad instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Cuerpo receptor o reúso
Campeche	Campeche	ExHacienda Kala (Siglo XXIII)	Lodos activados	15	15	Acuífero
Campeche	Campeche	Fovissste Belem	Lodos activados	10	10	Acuífero
Campeche	Campeche	Fraccionamiento Plan Chac	Filtros biológicos o percoladores	10	10	Aguas costeras
Campeche	Campeche	La Novia del Mar	Primario avanzado	10	10	Acuífero
Campeche	Campeche	Las Flores	Lodos activados	10	10	Acuífero
Campeche	Campeche	Los Laureles	Lodos activados	3	3	Acuífero
Campeche	Campeche	Presidentes de México	Humedales (Wetland)	12	12	Acuífero
Campeche	Campeche	PTAR San Francisco de Kobén	Dual	6	6	Acuífero
Campeche	Campeche	Samulá	Lodos activados	6	6	Acuífero

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Capa- cidad instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Cuerpo receptor o reúso
Campeche	Campeche	Siglo XXI	Lodos activados	15	15	Acuífero
Campeche	Campeche	Solidaridad Nacional	Lodos activados	10	10	Acuífero
Campeche	Campeche	VivaH99	Lodos activados	6	6	Se inyecta al subsuelo
Carmen	Ciudad del Carmen	Fraccionamiento Fovissste	Lodos activados	5	5	Laguna de Términos
Carmen	Ciudad del Carmen	Fraccionamiento San Manuel y San Francisco	Lodos activados	17	6	Golfo de México (La Caleta)
Carmen	Ciudad del Carmen	Infonavit ExFinca Arcila	Lodos activados	7.5	7.3	Golfo de México (La Caleta)
Carmen	Ciudad del Carmen	Infonavit Fraccionamiento Reforma	Lodos activados	10	9	Golfo de México (La Caleta)
Champotón	Champotón	Mercado Champotón	Lodos activados	2.5	2.5	Acuífero
Total de plantas en el Estado			17	155	142.8	

TABLA A9. PTAR EXISTENTES EN CAMPECHE Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Capacidad instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Cuerpo receptor o reúso
Benito Juárez	Cancún	Caribe 2000	Lodos activados	225	160	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	El Rey	Lodos activados	100	70	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Cucumatz	Lodos activados	200	150	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Isla Azul	Lodos activados	5	4	Riego de áreas verdes
Benito Juárez	Cancún	Norponiente (Cancún)	Filtros biológicos o percoladores	225	227.8	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Norte	Dual	350	285.7	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Playa Blanca	Anaerobio	2	1	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Pok-Ta-Pok	Lodos activados	245	200	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Polígono Sur	Lodos activados	200	38.5	Acuífero
Benito Juárez	Cancún	Puerto Morelos	Lodos activados	10	4.7	Acuífero
Benito Juárez	Puerto Morelos	Villas Morelos	Lodos activados	10	3.5	Acuífero
Cozumel	Cozumel	Hotel Reef	Lodos activados	5	5	Acuífero
Cozumel	Cozumel	San Miguelito	Lodos activados	220	93.8	Acuífero
Felipe Carrillo Puerto	Felipe Carrillo Puerto	Fovissste I (Fco. Villa)	Lodos activados	5	0.9	Acuífero
Isla Mujeres	Isla Mujeres	Isla Mujeres	Lodos activados	30	23.2	Acuífero
Lázaro Cárdenas	Chuiquilla	Chuiquilla	Dual	5	0.7	Acuífero
Lázaro Cárdenas	Holbox	Holbox	Dual	5	3.2	Acuífero

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Capacidad instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Cuerpo receptor o reúso
Othón P. Blanco	Bacalar	Bacalar	Lodos activados	30	0.9	Acuífero
Othón P. Blanco	Chetumal	Centenario	Lodos activados	120	120	Acuífero
Othón P. Blanco	Chetumal	Fovissste V	Lodos activados	5	4.3	Acuífero
Othón P. Blanco	Chetumal	Santa María	Lodos activados	2	1.7	Acuífero
Othón P. Blanco	Huay-Pix	Huay-Pix	Dual	5	0.9	Acuífero
Othón P. Blanco	Mahahual	Mahahual	Lodos activados	10	3.1	Acuífero
Othón P. Blanco	Subteniente López	Subteniente López	Lodos activados	7	1.4	Acuífero
Solidaridad	Playa del Carmen	Akumal	Dual	5	4.9	Acuífero
Solidaridad	Playa del Carmen	Playa del Carmen I (Gonzalo Guerrero)	Lodos activados	45	28.5	Acuífero
Solidaridad	Playa del Carmen	Playa del Carmen II (Saastun-Ha)	Lodos activados	284	246.4	Acuífero
Solidaridad	Playa del Carmen	Playacar	Lodos activados	150	60	Acuífero
Solidaridad	Puerto Aventuras	Puerto Aventuras	Dual	30	17.2	Acuífero
Solidaridad	Tulum	Bicentenario	Dual	120	12.3	Acuífero
Tulum	Ciudad Chemuyil	Chemuyil	Lodos activados	30	6.7	Acuífero
Total de plantas en el Estado			31	2,685.00	1,780.30	

TABLA A10. PTAR EXISTENTES EN QUINTANA ROO Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Capacidad instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Cuerpo receptor o reúso
Kanasin	Kanasin	Villas Oriente Kanasin	Lodos activados	15	15	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Caucel	Caucel I	Anaerobio	50	15.3	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Caucel	Caucel II	Anaerobio	50	15.5	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Caucel	Santa Fe	Discos Biológicos o Biodiscos	25	12	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Cholul	San Pedro Cholul	Lodos activados	12.5	5.2	Acuífero de Yucatán
Mérida	Mérida	Algarrobos	Lodos activados	1.4	1.4	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Altabrisa	Lodos activados	50	27.8	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Aquaparque	Lodos activados	1.7	1.7	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Cocoyoles	Lodos activados	2.2	2.2	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Colonia Alemán	Lodos activados	20	22.1	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Cordeleros de Chuburna	Anaerobio	1	1	Acuífero Península de Yucatán

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Capacidad instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Cuerpo receptor o reúso
Mérida	Mérida	Fraccionamiento Ciudad Industrial (Graciano Ricalde)	Anaerobio	2	1.8	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Fraccionamiento Fidel Velázquez	Lodos activados	8	2.6	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Fraccionamiento Pensiones I Etapa Fovissste	Lodos activados	3	3	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Fraccionamiento Villa Zona Dorada	Lodos activados	2.2	1.2	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Fraccionamiento Pensiones II Etapa	Lodos activados	12	6	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Las Américas	Anaerobio	50	30	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Las Américas 2	Lodos activados	34	14.8	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Loma Bonita	Anaerobio	1	0.8	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Los Héroes	Lodos activados	30	10.2	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Paseos de Opichen	Lodos activados	9.6	8.6	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	San José Tecoh	Anaerobio	10	6.8	Acuífero Península de Yucatán

Municipio	Localidad	Nombre de la Planta	Proceso	Capacidad instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Cuerpo receptor o reúso
Mérida	Mérida	Santa Cruz 2 - Ivey	Anaerobio	9	3.4	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Mérida	Valparaíso	Lodos activados	5.2	2.3	Acuífero Península de Yucatán
Mérida	Súsula	Súsula	Dual	18.5	7.3	Acuífero Península de Yucatán
Progreso	Campestre Flamboyanes	Fraccionamiento Flamboyanes	Lodos activados	7.5	7.5	Acuífero Península de Yucatán
Ticul	Ticul	Ticul	Lodos activados	1	1	Acuífero Península de Yucatán
Umán	Itzincab	Fraccionamiento Itzincab	Lodos activados	17	5.1	Acuífero Península de Yucatán
Total de plantas en el Estado			28	448.8	231.6	

TABLA A11. PTAR EXISTENTES EN YUCATÁN Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS