



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”

Análisis socioecológico de la planta de tratamiento de aguas residuales de Izúcar de Matamoros empleando el marco de referencia DPSIR

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

MARIANA ORTEGA VÁZQUEZ

Director de tesis:

Dr. Eduardo Torres Ramírez



Diciembre 2021



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



“La Tierra no es de nosotros, nosotros somos de la Tierra”

Análisis socioecológico de la planta de tratamiento de aguas residuales de Izúcar de Matamoros empleando el marco de referencia DPSIR

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta

MARIANA ORTEGA VÁZQUEZ

Comité tutorial:

Director	Dr. Eduardo Torres Ramírez
Tutora	Dra. María Elena Ramos Cassellis
Integrante Comité Tutorial	Dra. Anabella Handal Silva
Integrante Comité Tutorial	Dr. José Víctor Rosendo Tamariz Flores
Integrante Comité Tutorial	Dra. Araceli Espinosa Márquez
Integrante Comité Tutorial	Dra. Gabriela Pérez Osorio

Diciembre 2021



BUAP

C. Mariana Ortega Vázquez

Por este conducto me permito comunicarle que los miembros del jurado integrado por:

Dra. Gabriela Pérez Osorio *Presidente*
Dr. José Víctor Rosendo Tamariz Flores *Secretario*
Dra. Georgette Rebollar Pérez *Vocal*
Mtro. Idelfonso Magin Torreblanca Ramírez *Vocal*
Dra. Edith Chávez Bravo *Suplente*

Designado para la defensa de su tesis **“Análisis socioecológico de la planta de tratamiento de aguas residuales de Izúcar de Matamoros empleando el marco de referencia DPSIR”** han manifestado mediante su voto que esta cumple con los méritos suficientes para ser defendida como tesis de grado de Maestría en Ciencias Ambientales, por lo que este Posgrado le autoriza la impresión de la misma.

Sin otro asunto en lo particular, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Z; a 03 de diciembre de 2021

E. Torres. R.

Dr. Eduardo Torres Ramírez
Coordinador
Posgrado en Ciencias Ambientales



Agradecimientos

Agradezco la oportunidad de volver a formar parte de la comunidad BUAP.

Quiero agradecer profundamente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca recibida durante la realización de mis estudios de maestría con número de registro 988542.

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado por el apoyo otorgado para la conclusión de esta tesis dentro del Programa IV Investigación y Posgrado. Apoyar a los programas de posgrado para lograr su incorporación al Padrón Nacional de Calidad. Indicador establecido en el Plan de Desarrollo Institucional 2017 – 2021.

Al Posgrado en Ciencias Ambientales por haberme aceptado y formado como Maestra en Ciencias Ambientales. Gracias al Dr. Fernando Hernández Aldana (†) por haberme impulsado a entrar al posgrado y cursar mi maestría, él siempre confió en mi potencial, además me presentó con mi asesor de tesis el Dr. Eduardo Torres Ramírez, a quien le agradezco profundamente por compartir su conocimiento, su tiempo y por haberme tenido paciencia cuando migramos al mundo virtual, compartimos en este camino altas y bajas, pero fuimos un buen equipo.

Agradezco a mi comité tutorial, sin duda sus contribuciones fueron muy valiosas para enriquecer mi trabajo de tesis, también agradezco a mi profesor desde la licenciatura el Mtro. Magin Idelfonso Torreblanca Ramírez por compartirme su experiencia y asesorarme para concretar la propuesta tecnológica incluida en este trabajo.

Con mucha alegría agradezco la empatía, el soporte técnico y emocional que me dio Itzel Arroyo, a mis compañeras y amigas Mariel, Dánae y Maricarmen por todas las veces que hicimos equipo.

A toda mi familia, porque siempre se involucran de una u otra manera para que cumpla mis sueños y logre superarme personal y profesionalmente, gracias por tanto amor. También agradezco la compañía de Robertina y Nico.

Dedicatoria

Cuando tengo una idea nueva o un sueño tengo la fortuna de contar con el apoyo de mi mamá, es ella quien me ha enseñado a ser resiliente y quien siempre me ha repetido que, si me propongo las cosas, puedo lograrlas. Así que ella siempre me motiva y quien nos motiva a las dos es mi abuelita Nena que nos grita desde el cielo “¡Ellas siempre pueden!”.

A René, con quien he tenido la fortuna de comenzar esta aventura, gracias por siempre estar a mi lado, por ser mi alegría y mi confidente. Nos falta mucho por hacer, pero siempre es un placer compartir la vida, el amor y los éxitos contigo. El apoyo incondicional es mutuo y la inspiración para ser mejores en diferentes aspectos también. Gracias por ser el mejor esposo.

Por eso y más razones todo lo que hago se lo dedico especialmente a ustedes tres.

Índice general

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
III.	JUSTIFICACIÓN	4
IV.	OBJETIVOS	5
4.1	Objetivo general	5
4.2	Objetivos específicos	5
V.	MARCO DE REFERENCIA	6
5.1	Marco Teórico	6
5.1.1.	Antecedentes	6
5.1.1.1.	La importancia del agua	6
5.1.1.2.	Contaminación del agua	7
5.1.1.3.	Tratamientos convencionales del agua residual municipal e industrial en México... 9	
5.1.1.4.	Antecedentes de la PTAR de Izúcar de Matamoros	13
5.1.1.5.	Marco DPSIR	14
5.2.	Tipo de investigación	17
5.3	Marco legal	17
VI.	MATERIALES Y MÉTODOS	19
6.1.	Localización de la PTAR	19
6.2.	Caracterización biofísica usando Sistemas de Información Geográfica (SIG)	19
6.3.	Caracterización socioeconómica del sistema de estudio	20
6.4	Contexto político institucional	20
6.5	Documentación de los indicadores fisicoquímicos del agua residual	22
6.6	Desarrollo del marco DPSIR del sistema de estudio	22
VII.	RESULTADOS	23
7.1.	Ubicación de la PTAR de Izúcar de Matamoros y descripción de sus trenes de tratamiento	23
7.1.1.	Pretratamiento	23
7.1.1.1.	Cribado	24
7.1.1.2.	Tanque de igualación y cárcamo de bombeo	24
7.1.1.3.	Tanque de desengrasado	24
7.1.2.	Tratamiento primario	24
7.1.2.1.	Clarificador primario	24
7.1.3.	Tratamiento secundario	24

7.1.3.1.	Reactor aerobio de filtros biológicos o percoladores.....	24
7.1.3.2.	Clarificador secundario	25
7.1.4.	Desinfección de agua tratada	25
7.1.5.	Tratamiento de lodos	25
7.2	Caracterización biofísica de la zona de estudio usando SIG	27
7.3	Caracterización socioeconómica del sistema de estudio	28
7.3.1.	Índice demográfico.....	29
7.3.2.	Índice de marginación y migración.....	29
7.3.3.	Vivienda, disponibilidad de bienes, servicios y tecnologías de información y comunicación.....	29
7.3.4.	Actividades económicas.....	30
7.3.5.	Salud y discapacidad	31
7.3.6.	Educación y cultura.....	31
7.3.7.	Etnicidad	32
7.3.8.	Infraestructura social.....	32
7.4	Descripción del contexto socio-institucional.....	32
7.4.1.	Convenios e iniciativas internacionales.....	32
7.4.2.	Marco legal nacional	35
7.4.3.	Marco legal del Estado de Puebla (Leyes y Planes).....	36
7.4.4.	Plan Municipal de Desarrollo (PMD)	36
7.4.5.	Estructura institucional del Sistema Operador de la PTAR de Izúcar de Matamoros.....	37
7.5	Indicadores fisicoquímicos del efluente de la PTAR de Izúcar de Matamoros	38
7.6	Implementación del marco DPSIR para la PTAR en estudio	39
7.6.1.	Fuerzas Motrices	40
7.6.2.	Presiones	41
7.6.3.	Estados	42
7.6.4.	Impactos	43
7.6.5.	Respuestas	45
VIII.	PROPUESTA DE INTERVENCIÓN TECNOLOGÍA	51
8.1.	Datos fisicoquímicos del efluente de la PTAR	51
8.2.	Normatividad aplicable.....	52
8.3.	La ósmosis inversa y su aplicación en aguas residuales.....	54
8.4.	Simulación del proceso.....	57
8.5.	Optimización de la simulación.....	64
8.6.	Tratamiento terciario propuesto	65

IX. PERSPECTIVA.....	67
X. CONCLUSIONES	69
XI. LITERATURA CITADA	70
ANEXO 1. Descripción biofísica de la cabecera municipal de Izúcar de Matamoros.....	77
1. Climatología.....	77
2. Temperatura, precipitación e intemperismos	78
3. Geología	80
4. Geomorfología y sismicidad.....	82
5. Elevaciones M.S.N.M.....	83
6. Edafología, permeabilidad y degradación del suelo.....	84
7. Hidrología superficial	87
8. Hidrología subterránea	89
9. Tipos de uso de suelo y vegetación.....	90
ANEXO 2. Descripción biofísica de la cabecera municipal de Izúcar de Matamoros.....	92
a) Relaciones causales encontradas a partir de la Fuerza Motriz 1 y sus Respuestas.....	92
b) Relaciones causales encontradas a partir de la Fuerza Motriz 2 y sus Respuestas.....	93
c) Relaciones causales encontradas a partir de la Fuerza Motriz 3 y sus Respuestas.....	95
d) Relaciones causales encontradas a partir de la Fuerza Motriz 4 y sus Respuestas.....	96
e) Relaciones causales encontradas a partir de la Fuerza Motriz 5 y sus Respuestas.....	97
f) Relaciones causales encontradas a partir de la Fuerza Motriz 6 y sus Respuestas.....	98

Índice de tablas

Tabla 1. Tipos de tratamiento de aguas residuales	10
Tabla 2. Tratamientos para la eliminación de contaminantes orgánicos persistentes y emergentes.	12
Tabla 3. Ejemplos de aplicación del marco DPSIR para estudiar diferentes fenómenos ambientales. 16	
Tabla 4. Regulación aplicable en materia de agua para el presente proyecto.....	17
Tabla 5. Coordenadas UTM de la PTAR de Izúcar de Matamoros	19
Tabla 6. Características biofísicas de la zona de estudio	27
Tabla 7. Distribución de la población ocupada según su sector de actividad	30
Tabla 8. Afiliación a servicios de salud	31
Tabla 9. Población según el nivel de escolaridad	31
Tabla 10. Parámetros fisicoquímicos del efluente de la PTAR de Izúcar de Matamoros	39
Tabla 11. Fuerzas Motrices encontradas para la PTAR en estudio	41

Tabla 12. Presiones encontradas para la PTAR en estudio.....	42
Tabla 13. Descripción del Estado de la PTAR en estudio.....	43
Tabla 14. Impactos provocados por la PTAR en la zona de estudio.....	44
Tabla 15. Descripción de las Respuestas propuestas del sistema de estudio.....	47
Tabla 16. Parámetros fisicoquímicos máximos reportados de junio del 2018 a mayo del 2019.	51
Tabla 17. Comparación de los parámetros obtenidos con los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996	53
Tabla 18. Comparación de los parámetros con los límites máximos permisibles PROY-NOM-001-SEMARNAT-1996.....	53
Tabla 19. Comparación de los parámetros obtenidos con los límites máximos permisibles NOM-127-SSA1-1994	53
Tabla 20. Proyectos de aplicación de ósmosis inversa para diferentes propósitos realizados en México.	56
Tabla 21. Datos introducidos al simulador Winflows.....	58
Tabla 22. Datos de la membrana seleccionada.....	60
Tabla 23. Parámetros de operación de la membrana seleccionada	60
Tabla 24. Arreglo del sistema de membranas.....	60
Tabla 25. Datos resultantes del arreglo del sistema de membranas	61
Tabla 26. Resultados de la remoción de iones, otros parámetros y datos de saturación	62
Tabla 27. Resultados del producto y cumplimiento de la normatividad aplicable	63
Tabla 28. Comportamiento del ion nitrato antes y después de realizar el pretratamiento propuesto.	64
Tabla 29. Arreglo optimizado del sistema de membranas	64
Tabla 30. Datos resultantes del arreglo optimizado del sistema de membranas	65

Índice de figuras

Figura 1. Marco de referencia DPSIR.	15
Figura 2. Marco legal referente a la calidad del agua y a los COP encontrados en el agua residual.	21
Figura 3. Diagrama de flujo de la PTAR de Izúcar de Matamoros	26
Figura 4. Diagrama de la aplicación del Marco DPSIR a la PTAR de Izúcar de Matamoros.	49
Figura 5. Arreglo del sistema de membranas	61
Figura 6. Arreglo optimizado del sistema de membranas	65
Figura 7. Diagrama de flujo de la propuesta de actualización de la PTAR de Izúcar de Matamoros	66

Índice de mapas

Mapa 1. Fotografía aérea de la Cabecera Municipal de Izúcar de Matamoros.....	23
Mapa 2. Fotografía aérea de la PTAR de Izúcar de Matamoros.....	26
Mapa 3. Climatología.....	77
Mapa 4. Temperatura máxima promedio.....	79
Mapa 5. Temperatura mínima promedio.....	79
Mapa 6. Precipitación media anual.....	80
Mapa7. Geología, fallas y fracturas.....	81
Mapa 8. Geomorfología.....	83
Mapa 9. Elevaciones M.S.N.M.....	84
Mapa 10. Edafología.....	86
Mapa 11. Permeabilidad del suelo.....	86
Mapa 12. Degradación de suelos.....	87
Mapa 13. Hidrología superficial.....	88
Mapa 14. Hidrología subterránea.....	90
Mapa 15. Usos de suelo y vegetación.....	91

Índice de gráficas

Gráfica 1. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales por caudal tratado.	9
--	---

Índice de fotografías

Fotografía 1. Distribución de los procesos de la PTAR de Izúcar de Matamoros.....	27
---	----

I. INTRODUCCIÓN

El agua es muy importante para la supervivencia humana, para los animales y para las plantas ya que dependemos de ella diariamente; para beber, producir alimentos, para la irrigación y la industria. Si el agua no reúne las condiciones adecuadas en cantidad y calidad, puede generarse un impacto negativo sobre nuestra calidad de vida y salud (PAHO, 2007).

La seguridad hídrica es un tema de interés en todos los países, por eso se ha convertido en la doctrina de gestión del agua desde el siglo XX, ya que a través de ella se ha intentado garantizar el acceso al agua con calidad óptima para consumo humano, y la equidad en cuanto a su suministro, todo, para garantizar el bienestar de la sociedad que va de la mano con la seguridad alimentaria y con la sostenibilidad ambiental.

La gestión integral de recursos hídricos se apoya en la planificación e implementación de la seguridad hídrica, que necesita tener cimientos en un apoyo técnico y financiero que garantice el mantenimiento de la infraestructura y el suministro equitativo; además, reconoce la importancia de trabajar en red, aprendiendo de la experiencia en la gestión de otros tomadores de decisiones, tomando en cuenta las variables económicas, tecnológicas, operativas, climáticas, geográficas, políticas, culturales, educativas, etc. (Tiwari et al., 2015).

La necesidad del saneamiento del agua se debe a que actualmente su contaminación es una problemática que persiste y crece, por lo que es necesario contar con alternativas para su adecuado manejo integral, que incluye la vigilancia durante su uso, manejo y recuperación para usos posteriores, junto con la consideración de la influencia que puede ejercer sobre otros recursos naturales y la influencia que las actividades y decisiones humanas productivas o no productivas causan sobre su calidad (Alvarado et al., 2017).

El agua contaminada proviene de diferentes fuentes, por lo que su composición es muy variada; por esta razón, es necesario hacer una división de procesos de depuración según los objetivos que se persigan en cada sistema utilizado. Los tratamientos más comunes para agua residual se dividen principalmente en primarios, secundarios y avanzados (Rodie & Hardenberg, 1981).

Actualmente el desempeño de las plantas de tratamiento de agua residual convencionales resulta insuficiente e ineficiente para mitigar el efecto en los ecosistemas y la salud humana, ya que incluyen una cantidad elevada de compuestos químicos y biológicos, algunos de ellos de baja degradabilidad,

por lo que escapan al tratamiento, impactando al medio ambiente. Es por esto que se requiere evaluar y actualizar el desempeño de las plantas de tratamiento para minimizar los efectos de la contaminación de aguas residuales.

Para lograr un diagnóstico correcto, así como propuestas de actualización adecuadas, es indispensable que se considere que la gestión de la contaminación se aborde con estrategias interdisciplinarias que engloben la participación pública, el criterio de investigadores y académicos, la inversión económica, la gobernanza, las políticas y la tecnología, todo, para crear un entorno propicio que favorezca el desarrollo económico, ambiental y social, así como el intercambio de información (Cap-Net UNDP, 2016). Este acercamiento puede abordarse a través del marco de referencia DPSIR (*Driving force, Pressure, State, Impact and Response*) cuyas siglas en inglés significan: Fuerza Motriz, Presión, Estado, Impacto y Respuesta, que ha sido desarrollado por la Agencia Ambiental Europea como una herramienta para describir las interacciones entre la actividad humana y el medio ambiente. Este marco utiliza elementos y estrategias para integrar los aspectos sociales, culturales y económicos, con un enfoque de pensamiento sistémico, con el que se organizan y comunican los problemas a partir de las relaciones de causa-efecto identificadas, para a continuación, abordar acciones de gestión coordinadas entre los tomadores de decisiones (EPA, 2015).

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La gestión del agua residual constituye uno de los más grandes problemas ambientales, económicos y sociales en México y a nivel mundial, principalmente porque el volumen de las descargas en ocasiones crece más rápido que la población mundial. El saneamiento inadecuado de agua en México genera una sobrecarga del sector salud con un costo económico asociado que asciende a 5800 millones de dólares al año (Agenda 2030, 2017), dado que el contacto, exposición y uso de agua contaminada se relaciona con el desarrollo de enfermedades como la diarrea, el cólera, la disentería, la fiebre tifoidea y la poliomielitis. Se calcula que la contaminación del agua potable a nivel mundial provoca más de 502000 muertes anualmente (OMS, 2019). En el año 2016 en México se reportaron 2536 plantas de tratamiento municipales en operación, con ello se trataron 123.6 m³/s de agua residual, lo que corresponde al 58.3% de los 212.0 m³/s que fueron recolectados a través de los sistemas de alcantarillado (CONAGUA, 2017). El agua residual que no recibe un tratamiento adecuado es un problema que, para comprenderse y abordarse, requiere ser analizado como un problema ambiental que involucra las esferas socioeconómicas, ecológicas, políticas, e institucionales.

Para este trabajo de tesis se seleccionó como sistema de estudio la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) de la cabecera municipal de Izúcar de Matamoros, la cual presenta deficiencias de funcionamiento relevantes, por lo que no cumple con su papel en la mitigación de la contaminación. Se propone analizar la PTAR como un sistema complejo, para identificar los componentes y sus interrelaciones que expliquen las razones de su limitada funcionalidad. A la fecha algunos factores que se han detectado son los siguientes: (a) no opera de manera continua, (b) en los periodos de funcionamiento continuo presenta deficiencias en la remoción de materia orgánica y de contaminantes orgánicos persistentes y emergentes. Según García (2019), la DBO en el efluente ha mostrado valores por encima de lo permitido por la normatividad, alrededor de 160 mg O₂/L, mientras que los valores de DQO equivalían a 781 mg O₂/L (2019), y se han encontrado alrededor de 300 contaminantes orgánicos persistentes y emergentes como productos de cuidado personal, fármacos y derivados de alquifenoles (Herrera, 2017).

Lo anterior resulta en que la PTAR actúa como una fuente de contaminación a su cuerpo receptor que es el río Nexapa. Debido a la problemática ambiental asociada con la PTAR, el análisis de la planta como sistema complejo permitiría evaluar el desempeño ambiental y proponer acciones para la gestión integral de aguas residuales en el sistema de estudio.

III. JUSTIFICACIÓN

Los altos niveles de contaminación documentados del río Nexapa se deben en parte a la limitada funcionalidad de la PTAR de la cabecera municipal de Izúcar de Matamoros. Lo anterior hace necesario conocer todos los elementos involucrados para mejorar su papel en la mitigación de la contaminación. Para ello, esta propuesta incluye la identificación de los factores socioecológicos relacionados a la problemática utilizando el marco socioecológico DPSIR. Su aplicación permitirá generar información valiosa que puede ser comunicada a los tomadores de decisiones, públicos y privados, así como a la comunidad aledaña, para comprender de manera integral la problemática. El marco incluye la propuesta de intervenciones que, en su conjunto, permitiría gestionar de manera más holística el tratamiento de aguas residuales de la zona de estudio. Finalmente, con la propuesta desarrollada se pretende contribuir con el Objetivo 6 “Agua limpia y saneamiento”, de la Agenda 2030, toda vez que las intervenciones propuestas buscarán fortalecer la participación de los habitantes y demás tomadores de decisiones de la zona de estudio. A su vez, se busca mejorar la calidad del agua, aumentar el porcentaje del agua residual que recibe tratamiento y, a través de una actualización de la PTAR, aumentar considerablemente la reutilización del agua tratada en condiciones de seguridad.

IV. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Analizar los factores socioeconómicos, institucionales, ecológicos y tecnológicos involucrados en el desempeño de la PTAR de Izúcar de Matamoros aplicando el marco de referencia DPSIR.

4.2 Objetivos específicos

- Describir el proceso de tratamiento de la PTAR
- Determinar las fuerzas motrices económicas y sociales mediante el marco de referencia DPSIR, así como las presiones ambientales y de comportamiento humano que afectan en el desempeño de la PTAR
- Describir el estado ambiental y humano, así como el impacto hacia los servicios ecosistémicos y bienestar humano de los efluentes que se descargan desde la PTAR hacia el río Nexapa.
- Proponer respuestas de mejora para el manejo integral de las aguas residuales de la localidad de Izúcar de Matamoros.

V. MARCO DE REFERENCIA

5.1 Marco Teórico

5.1.1. Antecedentes

5.1.1.1. *La importancia del agua*

La Tierra con sus diversas y abundantes formas de vida, que incluyen a más de seis mil millones de seres humanos, se enfrenta en este comienzo del siglo XXI con una grave crisis debido a la escasez del agua (UNESCO, 2003). El agua es un bien natural fundamental para la salud, el desarrollo humano y los ecosistemas. Además, es clave para erradicar la pobreza, contribuir a la seguridad alimentaria y la energética. Sin embargo, millones de personas alrededor del mundo enfrentan problemas serios por el de agua, como son la escasez del recurso, la contaminación, la deficiencia de servicios (suministro y saneamiento), las inundaciones, las sequías y la extinción irreversible de ecosistemas hídricos y de sus servicios (UNESCO, 2016).

Los servicios ecosistémicos se refieren a la multitud de beneficios que la naturaleza aporta a la sociedad. La biodiversidad es la diversidad existente entre los organismos vivos, que es esencial para la función de los ecosistemas y para que estos presten sus servicios (FAO, 2019b). Los servicios ecosistémicos se pueden clasificar de acuerdo con (Neville et al., 2010) de la siguiente manera:

- a) Los que proveen bienes: alimentos, agua y madera.
- b) Aquellos que actúan como servicio de regulación del clima, de inundaciones, enfermedades, desechos, y calidad del agua, etc.
- c) Los que propician los servicios culturales: recreacionales y estéticos
- d) Y los que soportan servicios tales como la formación del suelo, la fotosíntesis y el ciclo de los nutrientes.

Mientras que de acuerdo con Mittermeier, Farrell, Harrison, Upgren, & Brooks (2018), los servicios ecosistémicos del agua se clasifican de la siguiente manera:

- a) Esenciales: abastecimiento de agua, alimentación, materias primas, recursos medicinales.

- b) De regulación: clima y gases atmosféricos, riesgos naturales, erosión del suelo, regulación del agua, control biológico, calidad del agua y procesamiento de residuos, formación de suelos.
- c) De aprovisionamiento: ciclo de nutrientes, hábitat y biodiversidad, producción primaria, polinización.
- d) Culturales: estéticos, recreación y turismo, educación y ciencia, espirituales y religiosos.

Debido a la inestabilidad del clima, el crecimiento poblacional y económico no sostenibles, la humanidad está buscando soluciones para enfrentar al desabasto y la contaminación del agua, mediante acciones para una adecuada gestión del recurso, para proteger su calidad, y para satisfacer y garantizar su disponibilidad (IMTA, 2018).

5.1.1.2. *Contaminación del agua*

El agua es necesaria para el uso doméstico, para las actividades comerciales e industriales, así como la agricultura y la ganadería, la extracción de minerales, la generación de energía, entre otros. La producción industrial, uso y disposición final de los productos químicos que usamos actualmente ha preocupado en las últimas tres décadas debido a su incorporación final en los compartimientos ambientales y biológicos. La naturaleza química de muchos de los compuestos químicos sintéticos reducen la eficiencia de los tratamientos tradicionales provocando desequilibrios en el ambiente y daños a la salud (Fernández, 2012).

Para lograr una gestión integral en el tratamiento de aguas residuales es necesario cambiar el esquema tradicional que las instituciones, la educación y la investigación han adoptado, ya que actualmente se siguen separando los estudios por disciplinas, temas y problemas unidimensionales, que llevan a trabajos independientes y a la toma de decisiones institucionales que incluso se contraponen. Es preciso cambiar este esquema para formar planes de trabajo para diagnosticar y manejar el recurso en forma integrada con un enfoque multi y transdisciplinario (Jimenez, 2015).

A pesar de que 2100 millones de personas han conseguido desde 1990 mejores condiciones de agua y saneamiento, la disponibilidad de agua potable de calidad ha ido decreciendo en todos los continentes (PNUD, 2019). Esta escasez afecta a más del 40% de la población mundial y probablemente esta cifra seguirá en aumento debido al cambio climático. Para garantizar el acceso universal a este recurso es necesario realizar inversiones en infraestructura, instalaciones sanitarias

y fomentar la higiene, esto implica llegar a más de 800 millones de personas que carecen de servicios básicos para el año 2030. En el año 2015, 4500 millones de personas no tenían servicio de saneamiento seguro y 2300 millones no tenían acceso a un saneamiento básico (PNUD, 2019).

El ciclo natural del agua tiene una gran capacidad de purificación; sin embargo, los ríos, lagos y mares recogen la basura producida por las actividades humanas, convirtiéndose en vertederos habituales de nuestros residuos. Los ríos, las zonas portuarias y las zonas industriales se han convertido en vertederos, cargadas de productos químicos, espumas y toda clase de contaminantes. Este problema ocurre tanto en los países en vías de desarrollo como en los países desarrollados. La mayoría de las situaciones de contaminación han evolucionado hasta llegar a ser visibles y medibles, entre las fuentes más importantes de contaminación del agua han sido las aguas residuales domésticas, los efluentes industriales y agrícolas, los escurrimientos pluviales y las tormentas (PAHO, 2007).

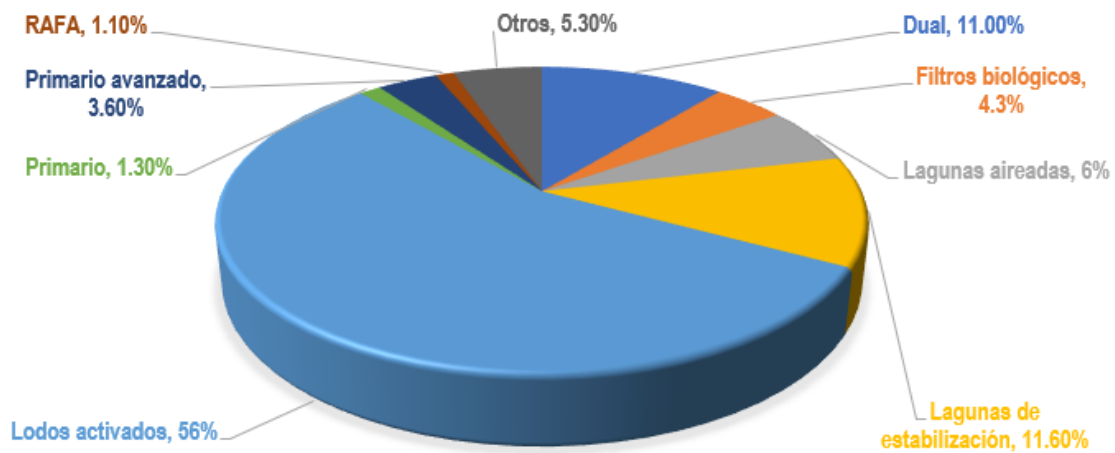
La contaminación natural del agua es difusa ya que involucra el transporte, la transformación de desechos, y en ella, la autodepuración (conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos) tiende a destruir los contaminantes incorporados; por otro lado, la contaminación producida por el hombre es puntual y afecta una zona en particular (UNAM, 2014) que, en determinadas condiciones ambientales, puede alcanzar zonas lejanas de la fuente, debido a que generalmente se realizan descargas continuas o accidentales de aguas residuales u otros contaminantes, cuyos aportes están o no identificados, localizados, monitoreados y controlados. El crecimiento económico de los países y la reducción de la pobreza puede impulsarse con la mejora del abastecimiento de agua, saneamiento y gestión de recursos hídricos. En la actualidad persisten las desigualdades geográficas, socioculturales y económicas, en donde la población instalada en asentamientos informales, ilegales o de bajos ingresos tienen un menor acceso al agua potable y saneamiento por lo que quedan expuestos al riesgo de contraer infecciones o enfermedades, tales como el cólera, diarrea, disentería, hepatitis A, fiebre tifoidea y poliomielitis (OMS, 2019).

Los principales efectos que produce el agua contaminada en el medio ambiente son: transmisión de enfermedades por medio del agua, pérdida de los ecosistemas, riesgo de infecciones crónicas en los seres humanos asociadas a la contaminación química, pérdida de suelos por erosión y disminución de la productividad de los suelos irrigado. (Fernández, 2012).

5.1.1.3. *Tratamientos convencionales del agua residual municipal e industrial en México*

En el año 2016 fueron tratados 123.6 m³/s de agua residual colectada a través de los sistemas de alcantarillado, en las 2536 plantas municipales en operación a lo largo del país (CONAGUA, 2017).

Los tratamientos más comunes para agua residual se dividen principalmente en primarios, secundarios y avanzados (Rodie & Hardenberg, 1981). En México la CONAGUA, reporta los principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales por caudal tratado en la siguiente gráfica:



Gráfica 1. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales por caudal tratado.
CONAGUA, 2016.

En la región hidrológico-administrativa IV, Río Balsas, existían 222 plantas de tratamiento en operación, con una capacidad instalada promedio de 10.75 m³/s y un caudal tratado promedio de 8.66 m³/s. Mientras que la industria trató 75.9 m³/s de aguas residuales, en 3041 plantas en operación a nivel nacional. En ese mismo año, en el Estado de Puebla había 219 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en operación con una capacidad instalada promedio de 1.102 m³/s, y el caudal tratado promedio fue de 0.961 m³/s.

En la Tabla 1 se distinguen los tipos de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales en México, reportados por (CONAGUA, 2017).

Tabla 1. Tipos de tratamiento de aguas residuales

Tratamiento		Tecnologías
Primario	Ajuste de pH, temperatura, color, olor y remoción de materiales orgánicos y/o inorgánicos en suspensión con tamaño igual o mayor a 0.1 mm y eliminación de materia flotante.	<ul style="list-style-type: none"> • Homogenización • Neutralización • Ajuste de pH • Coagulación • Floculación • Flotación • Desarenado • Desaceitado • Cribado
Secundario	Reducción de la contaminación química y biológica (DQO y DBO) a través de procesos químicos y biológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Lodos activados <ul style="list-style-type: none"> ○ De lecho fijo ○ De lecho móvil ○ De lecho fluidizado ○ Convencional ○ Oxígeno puro ○ Aireación extendida • Lagunas aerobias • Lagunas anaerobias • Biodiscos • Filtros biológicos • Digestión anaerobia • Sedimentación • Procesos anóxicos • Humedales artificiales
Terciario	Remoción de materiales disueltos que incluyen gases, iones, sustancias orgánicas naturales y sintéticas. Esto incluye desinfección para eliminar patógenos	<ul style="list-style-type: none"> • Membranas <ul style="list-style-type: none"> ○ Microfiltración ○ Ultrafiltración ○ Ósmosis inversa ○ Electrodialisis • Intercambio iónico • Redox • Precipitación • Adsorción • Ozonificación • Luz ultravioleta

Elaboración propia, 2021.

En México las descargas de agua residual tratada están reguladas por la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Este conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos deben ser cumplidos por los responsables de las descargas con el fin de preservar y controlar la calidad del agua del cuerpo receptor. Los parámetros para contaminantes básicos que

deben cumplir con los límites máximos permisibles establecidos son: temperatura, pH, grasas y aceites, material flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno y fósforo totales. Mientras que los parámetros relacionados con metales pesados y cianuros son: Arsénico, Cadmio, Cianuros, Cobre, Cromo, Mercurio, Níquel, Plomo y Zinc. Y entre los contaminantes patógenos y parasitarios se consideran los coliformes fecales y los huevos de helminto (SEMARNAT, 1997).

Adicionalmente en la actualidad hay una creciente preocupación, por la contaminación provocada por compuestos químicos y biológicos, como los llamados Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) y los Contaminantes Emergentes (CE).

Los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP), son sustancias químicas que se caracterizan por ser persistentes, bioacumulables, altamente tóxicos y por tener la capacidad de transportarse a larga distancia. Los más importantes por su impacto en la salud pública como por su persistencia en el medio ambiente son las dioxinas, los policlorobifenilos, las sustancias perfluoroalquiladas, los retardantes de llama bromados y parafinas cloradas. Algunos de estos son subproductos no intencionados de los procesos químicos de combustión de origen natural y antropogénica, otros de ellos no son naturales, lo que significa que son producidos intencionalmente para ser usados en la industria como aditivos, lubricantes, etc. (Convenio de Estocolmo, 2019).

El Convenio de Estocolmo es un tratado mundial integrado por 182 Partes, cuyo propósito es proteger la salud humana y el medio ambiente, hasta mayo del 2019 enlistaba treinta COP en sus tres anexos, los cuales clasifican los COP sujetos a eliminación, restricción o reducción de sus emisiones no intencionales (PNUMA, 2019). A pesar de esto, algunos siguen siendo liberados a través de desechos no controlados o fugas.

Por otro lado, los Contaminantes Emergentes (CE) carecen de regulación, a pesar de tener una alta persistencia y baja degradabilidad, por lo general su presencia en el ambiente no es nueva, pero si la preocupación derivada de los impactos ecológicos que pueden ocasionar, ya que se ha reportado que estos compuestos y sus metabolitos reactivos causan efectos toxicológicos en diferentes organismos y microorganismos aun cuando se presentan en concentraciones bajas (Robledo et al., 2017). Se ha identificado que estos se incorporan en el ambiente a través los compuestos químicos aplicados en los hogares, en la industria, en las actividades agrícolas y ganaderas, así como en las de servicio, por esta razón se han encontrado en concentraciones

crecientes en el agua residual que contiene una mezcla de ellos, como: productos de cuidado personal, fármacos, pesticidas, tensoactivos, productos de cuidado personal, etc. Por lo que es necesario determinar tanto sus impactos en los ecosistemas y en la salud humana, de tal manera que puedan ser candidatos a regulación futura (Gil et al., 2012).

En México, las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales no están diseñadas ni cuentan con la infraestructura necesaria para eliminarlos. En la Tabla 2 se describen los métodos empleados más comunes para su eliminación (Gil et al., 2012).

Tabla 2. Tratamientos para la eliminación de contaminantes orgánicos persistentes y emergentes.

Tratamientos	Procesos	Ventajas	Desventajas
Tratamientos fisicoquímicos	Coagulación y floculación	Simplicidad y rentabilidad Separa muchos tipos de partículas del agua Mejora el proceso de filtración	Se requiere del uso de productos químicos. Incapaces de remover compuestos de rompimientos de endocrinas.
	Adsorbentes con Carbones activados	No generan subproductos	Se requiere gran consumo de adsorbente para lograr absorber contaminantes orgánicos polares.
	Ultrafiltración (UF) con Membranas	Estabilidad y calidad del permeado estable con independencia de picos de carga	Infectiva para la remoción de la mayoría de los contaminantes emergentes, debido a la capacidad de retención limitada de las membranas de UF.
	Nanofiltración y ósmosis inversa	La ósmosis inversa puede alcanzar una remoción casi completa de contaminantes.	Alto consumo energético.
	Oxidación cloro u ozono	Elimina compuestos orgánicos particularmente aquellos insaturados o que contienen anillos aromáticos o heteroátomos.	La reacción de estos químicos produce bioproductos cuyos efectos se desconocen.
	Procesos Avanzados de Oxidación, cavitación, oxidación fotocatalítica, química Fenton.	Oxida la mayoría de los compuestos químicos complejos presentes en aguas residuales. Se puede combinar con ozono y otros agentes oxidantes para mejorar la degradación de productos polares y metabolitos. Tiene bajo costo y estabilidad química	Su aplicación al tratamiento de grandes volúmenes de agua es difícil, debido al costo de la radiación artificial a través de lámparas UV eléctricas.

Tratamientos	Procesos	Ventajas	Desventajas
	Electroquímica (electrocoagulación) El electrón es el único "reactivo" intercambiado	No se utilizan reactivos químicos. Se evita el transporte y la manipulación de compuestos altamente oxidantes. Las celdas electroquímicas no se utilizan productos químicos, por lo tanto, no se presenta una contaminación secundaria.	Los electrodos necesitan ser reemplazados con regularidad debido a su oxidación. El uso de la electricidad es costoso.
Tratamientos biológicos	Biorreactores con membrana	Baja la carga de los lodos en términos de DBO por lo que las bacterias quedan forzadas a mineralizar compuestos orgánicos degradables adaptarse a sustancias resistentes al tratamiento. La larga vida de los lodos ayuda a las bacterias a adaptarse a sustancias resistentes al tratamiento.	Se debe combinar con un proceso de UF para mejorar su eficiencia. Existen pocos reportes de su comportamiento frente a contaminantes emergentes.
	Microalgas, Lodos activados, filtros de goteo biológico	Pueden convertir rápidamente compuestos orgánicos acuosos en biomasa separable por sedimentación	No todos los compuestos tales como esteroides o estrógenos son completamente degradados o convertidos a biomasa. Solo remueven una parte de contaminantes emergentes, particularmente los polares.

Elaboración propia, 2019. Con datos de (Gil et al., 2012)

5.1.1.4. Antecedentes de la PTAR de Izúcar de Matamoros

La planta de tratamiento de agua residual de Izúcar de Matamoros opera desde el año 2008 y recibe las aguas residuales de la cabecera municipal de Izúcar de Matamoros, que para el año 2020 contaba una población de 49,578 habitantes, lo que significaba el 59.1% de la población municipal (INEGI, 2021). La PTAR fue diseñada para tratar 90 L/s con base en la NOM-001-SEMARNAT-1996, mediante un tratamiento secundario. Una vez que el agua residual ha recibido tratamiento se descarga al río Nexapa que es un efluente del río Atoyac. Es importante mencionar que en el municipio de Izúcar de Matamoros los servicios de agua potable, drenaje y saneamiento los proporciona el Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Izúcar de Matamoros (SOSAPAMIM).

A pesar de su diseño, se estima que la PTAR solo recibe 60 L/s y en algunas ocasiones esta no opera de manera continua, mientras que cuando opera de manera continua se presentan deficiencias en la remoción de ciertos contaminantes, entre ellos DBO, DQO, fármacos, productos para el cuidado personal y otros contaminantes emergentes como estimulantes, fragancias, protectores solares, etc. (Herrera, 2016).

5.1.1.5. Marco DPSIR

El marco de referencia Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR), traducido al español como Fuerza Motriz-Presión-Estado-Impacto-Respuesta, fue desarrollado Agencia Ambiental Europea y ha sido utilizado por PNUMA y adoptado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para relacionar las actividades humanas con el Estado del medio ambiente (EPA, 2015). Este marco de pensamiento sistémico permite capturar, organizar y visualizar los resultados ambientales, sociales y económicos de las decisiones humanas.

La metodología para aplicar el marco de referencia DPSIR se ilustra en la Figura 1. Este marco exige la comprensión precisa de la problemática que se desea resolver, y este proceso se facilita dando respuesta a cinco preguntas básicas: a) ¿Qué problemática existe en el ambiente biótico o abiótico? (Estados) (b) ¿Qué acciones económicas o sociales están generando la problemática y qué presión ejerce ésta sobre el ambiente o en el comportamiento humano? (Fuerzas Motrices, Presiones) (c) ¿Cuáles son las consecuencias que esta problemática significa para los bienes y servicios ecosistémicos y el bienestar humano? (Impactos) (d) ¿Qué se está haciendo o que se propone hacer para resolver la problemática de manera integral? (Respuestas) y (e) ¿Qué medidas podrían tomarse para asegurar un futuro más sostenible? (Respuestas). La solución a estas preguntas permite conocer un panorama general sobre el sistema en estudio, entender sus tendencias, su dinámica, la influencia de las decisiones humanas sobre el ambiente y además, permite concebir un enfoque a futuro que contemple el comportamiento de la problemática al aplicar o no acciones para proteger el ambiente y/o mejorar su condición.

Este marco vincula las causas que comienzan con “Fuerzas Motrices” que son los factores socio-económicos que promueven actividades que causan cambios en el medio ambiente como el tamaño y la composición de la población, el uso de los recursos y la educación; las Fuerzas Motrices influyen positiva o negativamente al sistema, ejerciendo “Presiones” en el medio ambiente, por lo que pueden modificar la cantidad y calidad de los recursos naturales, como son las emisiones, las

descargas y los desechos generados; estas Presiones ejercen un cambio en el “Estado” de los componentes bióticos y abióticos de un área determinada, causando “Impactos” en los ecosistemas, y en algunos aspectos particulares como la calidad de vida, la salud humana, el ambiente construido y la economía urbana local; lo anterior, analizado de una manera interrelacionada puede dar lugar a “Respuestas”, son acciones individuales o colectivas que amortiguan o evitan Impactos ambientales negativos; corrigen el daño causado al medio ambiente; conservan los recursos naturales o contribuyen a mejorar la calidad de vida de la población local. Las Respuestas pueden incluir la formulación y aplicación de políticas, la implementación de herramientas de apoyo para la toma de decisiones, cambios en estrategias administrativas, limitación en la descargas y emisiones al medio ambiente, gestión y uso de recursos y residuos, modificación del comportamiento humano, planeación comunitaria, investigación científica, cálculo de costos ambientales y médicos, comunicación de información relacionada con el medio ambiente. Como puede observarse, las Respuestas o intervenciones pueden implementarse en cualquier punto del espectro causal como se puede observar en la Figura 1.

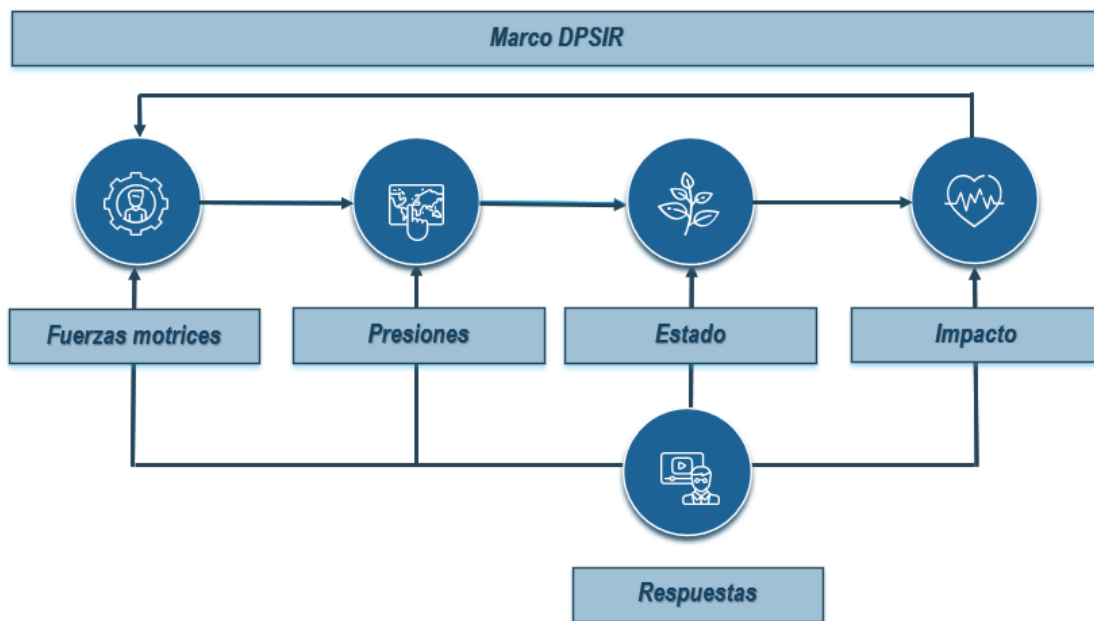


Figura 1. Marco de referencia DPSIR.

Elaboración propia con datos de (European Environment Agency, 1998)

Establecer un marco DPSIR para un entorno particular es una tarea compleja ya que todas las relaciones causas-efectos tienen que describirse cuidadosamente y los cambios ambientales rara vez se pueden atribuir a una sola causa (FAO, 2019a). No obstante, al ser un modelo flexible y de lógica en extremo sencilla que favorece la comunicación y cooperación entre tomadores de decisiones y su adaptación se ha logrado aplicar en diferentes áreas como gestión de recursos hídricos y de cuencas hidrográficas, sistemas marinos, capacidades reguladoras de los servicios ecosistémicos, desarrollo de indicadores, evaluación de la degradación ambiental, desempeño ambiental, etc. Algunos ejemplos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Ejemplos de aplicación del marco DPSIR para estudiar diferentes fenómenos ambientales.

Estudio ambiental	Autores	País	Año
Enfoque integral para la gestión de aguas subterráneas en zonas costeras.	Mimidis, K., Andrikakou, P., Kallioras, A. y Pliakas, F.	Grecia	(2017)
Determinación del papel de medio ambiente en la transferencia acelerada de enfermedades.	Everard, M., Johnston, P., Santillo, D. y Staddon, C.	U.K.	(2020)
Medición y comparación de los estados y las tendencias de las actividades humanas y su afección en reservas ecológicas, y generación estrategias para la conservación y gestión de ecosistemas marinos.	Arroyo, M., Levine, A., Brenner, L., Seingier, G., Leyva, C. y Espejel, I.	México	(2020)
Toma de decisiones con base en la organización multidimensional de información ambiental compleja	Agyemang, I., McDonald, A. y Carver, A.	Ghana	(2007)
Evaluación del desempeño ambiental de áreas “insulares” considerando la contaminación actual, el conocimiento contemporáneo y las estrategias implementadas.	Loizia, P., Voukkali, I., Zorpas, A.A., Navarro, J., Chatziparaskeva, G., Inglezakis, V.J., Vardopoulos, I. y Doula, M.	Chipre, España y U.K.	(2021)

Elaboración propia, 2021.

La importancia de desarrollar el marco DPSIR en el sistema de estudio se debe a que este será útil para priorizar y fijar intervenciones que coadyuven a mejorar el desempeño ambiental de la PTAR con base en la identificación de las Fuerzas Motrices, las Presiones que generan, y del diagnóstico de estado biofísico.

5.2. Tipo de investigación

Para fines de este trabajo de investigación se hará uso de las investigaciones de tipo exploratoria y descriptiva. Los estudios exploratorios identifican relaciones entre variables, determinan tendencias y establecen la línea general de investigaciones posteriores más rigurosas, por lo tanto, carecen de hipótesis, al igual que los estudios descriptivos que integran las mediciones con la mayor precisión posible de cada una de las variables para decir cómo es y cómo se manifiesta un fenómeno de interés (Hernández-Sampieri, R. & Mendoza, 2018).

5.3 Marco legal

La regulación mexicana en materia de agua y medio ambiente aplicable para el presente proyecto de investigación se sustenta principalmente en: La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la Ley de Aguas Nacionales (LAN), la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) y Normas Oficiales Mexicanas del Sector Ambiental expedidas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

A continuación, en la Tabla 4, se concentran los puntos más destacables de cada regulación aplicable en materia de agua para el presente proyecto.

Tabla 4. Regulación aplicable en materia de agua para el presente proyecto

Regulación	Extracto de la regulación aplicable
Constitución Política de Los Estados Unidos Mexicanos, 1917	Artículo 4 En este se lee <i>“Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar”</i> , además <i>“toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento del agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible”</i>
	Artículo 27 Señala que las aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional son propiedad de la nación. Adicionalmente en este artículo establece que, exceptuando algunos casos, el Estado es el propietario original de las aguas nacionales
	Artículo 115 Menciona que <i>“La prestación de los servicios públicos para el suministro de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales se confía a la competencia de los Municipios”</i> . Y que <i>“los servicios que deben ser debidamente regulados y normados para garantizar los derechos fundamentales de los gobernados para acceder al agua”</i>
Ley de Aguas Nacionales 1992. (Última Reforma DOF)	Es una ley <i>“reglamentaria del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales. Esta regula el uso, aprovechamiento o explotación del recurso, así como su distribución,</i>

Regulación	Extracto de la regulación aplicable
24-03-2016)	<p>uso y preservación de su cantidad y calidad para lograr un desarrollo integral sustentable”.</p> <p>Artículo 9</p> <p>En el establece a la Comisión Nacional de Agua (CNA) como autoridad administrativa en materia de aguas nacionales. Por lo que ésta se encarga de “vigilar el cumplimiento y aplicación de la Ley en materia de expedir: títulos de concesión, asignación o permiso de descarga”.</p> <p>La LAN establece que el agua es un “bien de dominio público general, vital, vulnerable y finito, con valor social, económico y ambiental” y señala que “la gestión de los recursos hídricos debe realizarse de manera integrada y por cuenca hidrológica, y que los servicios ambientales que proporciona el agua deben cuantificarse y pagarse”.</p>
<p>Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Al Ambiente 1988 (Última Reforma DOF 09-01-2015)(Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección Al Ambiente (Última Reforma DOF 09-01-2015), 1988)</p>	<p>Instrumento jurídico relevante en materia ambiental en el país.</p> <p>En materia de agua esta señala que “la prevención y el control de la contaminación del agua, es fundamental para evitar que se reduzca su disponibilidad y para proteger los ecosistemas del país”. Al mismo tiempo enfatiza “la responsabilidad compartida entre el Estado y la sociedad para prevenir la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas”. Y “establece que aquellas instituciones y/o actividades productivas susceptibles de producir contaminación en el agua, tienen la responsabilidad de tratar las descargas que generen, de tal manera que se garantice el equilibrio en los ecosistemas, las aguas residuales urbanas también deben recibir tratamiento para su descarga a los diferentes cuerpos receptores de agua”</p>
<p>Normas Oficiales Mexicanas</p>	<p>Son definidas en la Ley Federal de Metrología y Normalización como “la regulación técnica de observancia obligatoria expedida por las dependencias competentes, que establece reglas, especificaciones, atributos, directrices, características o prescripciones aplicables a un producto, proceso, instalación, sistema, actividad, servicio o método de producción u operación, así como aquellas relativas a terminología, simbología, embalaje, marcado o etiquetado y las que se refieren a su cumplimiento o aplicación”. (Artículo 3, fracción XI).</p> <p>NOM-001-SEMARNAT-1996 “Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales”.</p>
<p>Ley Orgánica de La Administración Pública Del Estado de Puebla, 2019</p>	<p>En su Artículo 47, fracción XV. “Coadyuvar con las autoridades federales, municipales y los sistemas operadores en la regulación de las descargas de origen industrial, de servicios, de origen municipal, agropecuarias y acuícolas, y su mezcla con otras descargas; así como vertimiento de residuos en cuerpos y corrientes de agua y la disposición final de los lodos generados en los sistemas de tratamiento de aguas...”.</p>
<p>Ley de Aguas Del Estado de Puebla, 2012.</p>	<p>“Define y regula de manera clara los servicios de agua potable, drenaje, alcantarillado, saneamiento, reúso y suministro de agua para acceder al derecho fundamental previsto en el artículo 4o. de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”.</p>

Elaboración propia, 2019.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Localización de la PTAR

La planta de tratamiento de aguas residuales operada por SOSAPAMIM se ubica en el municipio urbano de Izúcar de Matamoros, mismo que se encuentra en el suroeste del Estado de Puebla.

El río Nexapa divide a la cabecera municipal de Izúcar de Matamoros en dos partes y en sus márgenes derecho e izquierdo se instalaron colectores que reciben todas las aguas residuales generadas y la conducen hasta la PTAR que se ubica a 60 metros del río Nexapa, en el cual descarga el agua residual tratada.

En la Tabla 5 se muestran las coordenadas *Universal Transversal Mercator* (UTM), (X,Y) de los vértices exteriores del predio donde se ubica la PTAR.

Tabla 5. Coordenadas UTM de la PTAR de Izúcar de Matamoros

Vértice	Coordenadas UTM*	
	Este (X)	Norte (Y)
1	555432.74	2052979.58
2	555439.62	2053008.42
3	555443.59	2053056.57
4	55540.69	2053011.59
5	555479.31	2052951.27

*Proyección UTM, Datum WGS84. Zona UTM 14 N
Elaboración propia, 2021.

6.2. Caracterización biofísica usando Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Para llevar a cabo la caracterización biofísica del sistema de estudio, se empleó información obtenida de las bases de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), para representar cartográficamente el relieve, los rasgos hidrográficos, climatológicos, edafológicos, usos de suelo y vegetación, así como localidades, vías de comunicación, etc.

Una vez obtenidos estos datos, se procedió a la superposición del área de estudio con los mapas temáticos que se consideraron destacables de acuerdo con la presente investigación, para

determinar las principales características de los componentes biofísicos del sistema de estudio. Para llevar a cabo esta caracterización se empleó Arc Gis 10.5 que corresponde a un conjunto de productos de *software* en el campo de los Sistemas de Información Geográfica o SIG. Producido y comercializado por ESRI, bajo el nombre genérico ArcGIS. En este se agrupan diversas aplicaciones para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.

Los datos representados en los mapas tienen una Proyección UTM; DATUM Geodésico WGS84 México. Zona UTM 14 Norte.

6.3. Caracterización socioeconómica del sistema de estudio

Para hacer la caracterización socioeconómica del sistema de estudio, se obtuvieron datos estadísticos de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), Consejo Nacional de Población (CONAPO), etc., con el fin de conocer el índice demográfico, de marginación, de pobreza, de educación, salud, infraestructura social, economía, comercio, servicios públicos, que nos ofrezcan los datos relevantes a considerar en la presente investigación.

6.4 Contexto político institucional

Para contextualizar la problemática asociada a la contaminación del agua residual y a la contaminación del agua por Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) desde la perspectiva político institucional, se realizó una búsqueda de información relacionada con estos temas, ya que diferentes actores han sentado las bases para combatir esta problemática, con el objetivo de proteger la salud humana y el medioambiente.

La contaminación del agua constituye un problema medioambiental de una magnitud considerable a nivel mundial que impacta en las dimensiones económicas, ambientales y sociales ya que de ella dependen en gran medida la supervivencia y bienestar de las naciones. Por esta razón se buscó conocer el marco legal referente al agua, las iniciativas que existen para garantizar su disponibilidad, uso, aprovechamiento sustentable, preservación, calidad, saneamiento y disposición. Así como identificar el alcance de los convenios firmados en materia de contaminación del agua específicamente COP.

Para ello, el análisis se realizó mediante la pirámide de Kendal (Figura 2) que ilustra la revisión de las acciones legales, convenios, programas y políticas que se aplican a nivel internacional y nacional (en sus tres niveles, federal, estatal y municipal). En este sentido, a nivel internacional, se han firmado convenios para promover la participación colaborativa para adoptar medidas, establecer objetivos e indicadores enfocados a proteger la salud humana y los ecosistemas de los efectos adversos provocados por los COP. Como ya se mencionó, a nivel nacional la regulación mexicana en materia de agua y medio ambiente aplicable para esta problemática se sustenta principalmente en: La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la Ley de Aguas Nacionales (LAN), la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) y dos Normas Oficiales Mexicanas del Sector Ambiental expedidas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), sin embargo, México no considera un marco legal específico para combatir los COP.

En estos documentos, se realizó la búsqueda de números de convenios firmados, número y tipo de acciones implementadas y número de resultados publicados.



Figura 2. Marco legal referente a la calidad del agua y a los COP encontrados en el agua residual.
(Elaboración propia, 2020).

Aunado a lo anterior, se analizará la estructura institucional que se encarga de regular e integrar a través de un mismo organismo operador, los servicios de: agua potable, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales a través de las facultades de los tres niveles de gobierno de nuestro país.

6.5 Documentación de los indicadores fisicoquímicos del agua residual

Se documentaron los datos fisicoquímicos del agua del efluente de la Planta de Tratamiento de Agua residual de Izúcar de Matamoros, obtenidos en junio del 2018, enero y mayo del 2019 y reportados por (García, 2019) . Los parámetros fisicoquímicos fueron DQO, DBO, pH, conductividad, sólidos suspendidos, cloro libre, sulfato, níquel, calcio, magnesio, hierro, nitratos y fosfatos.

6.6 Desarrollo del marco DPSIR del sistema de estudio

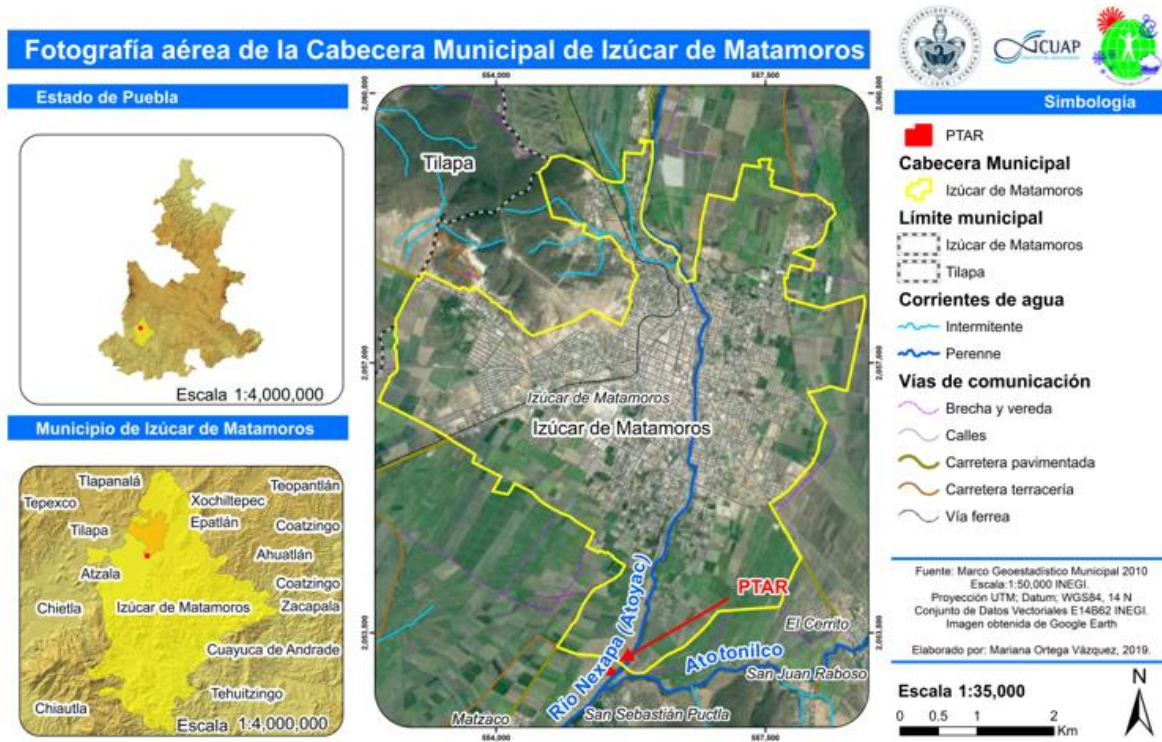
Para determinar los factores de desempeño ambiental de la PTAR se utilizó el marco conceptual DPSIR; con el cual se identificaron y organizaron los datos biofísicos, socioeconómicos y ambientales. La integración de la información se llevó a cabo con base en el documento de soporte técnico publicado por la EPA (2015), dirigido a tomadores de decisiones para que puedan aplicar el marco DPSIR en apoyo de la toma de decisiones ambientales complejas.

Además, se llevaron a cabo reuniones con expertos en el tema como la Dra. Gabriela Pérez Osorio, la Dra. María Elena Ramos Cassellis, el Dr. José Víctor Tamariz Flores, la Dra. Araceli Espinosa Márquez y el Mtro. Magin Idelfonso Torreblanca Ramírez. Así como informantes académicos clave como el Dr. Amado Enrique Navarro Frómata y el Dr. Jorge Antonio Herrera Cárdenas, ambos de la Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros y servidores públicos estatales que solicitaron el anonimato dada la naturaleza de los datos recabados.

VII. RESULTADOS

7.1. Ubicación de la PTAR de Izúcar de Matamoros y descripción de sus trenes de tratamiento

La planta de tratamiento de aguas residuales se ubica en Estado de Puebla, en el municipio de Izúcar de Matamoros, dentro de la cabecera municipal denominada también Izúcar de Matamoros. En el Mapa1 se puede observar su ubicación respecto a la fotografía aérea de la cabecera municipal.



Mapa 1. Fotografía aérea de la Cabecera Municipal de Izúcar de Matamoros (Elaboración propia, 2019).

La planta de tratamiento de aguas residuales operada por SOSAPAMIM fue diseñada para dar cumplimiento a los parámetros establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, mediante el diseño de dos trenes de tratamiento idénticos que suman una capacidad instalada de hasta 90 L/s y se encuentra en operación desde el año 2008. Sus etapas de tratamiento son: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y desinfección, mismas que se describen a continuación:

7.1.1. Pretratamiento

El pretratamiento por cada tren cuenta con las siguientes etapas:

7.1.1.1. *Cribado*

El pretratamiento comienza con un cribado grueso, este se utiliza para retener los residuos grandes en un bastidor de barras.

7.1.1.2. *Tanque de igualación y cárcamo de bombeo*

En esta etapa el agua mantiene una velocidad uniforme en un canal para permitir la sedimentación de arenas o partículas inorgánicas según sea su peso específico, manteniendo en suspensión a la materia orgánica. La arena extraída es recolectada y transportada manualmente hacia un contenedor de almacenamiento para su disposición final.

El agua pasa del canal de desarenado hacia el cárcamo de bombeo que consta de tres bombas, dos funcionando y una de relevo para llegar hasta el tanque de desengrasado.

7.1.1.3. *Tanque de desengrasado*

Su función es la separación física por diferencia de densidad, en esta etapa se logran separar grasas y aceites, así como decantar los sólidos de mayor tamaño. La separación de grasas y aceites es importante para aumentar el rendimiento del tratamiento secundario, además las grasas aumentan la cantidad de DBO₅ a la salida de la PTAR. Las grasas y aceites removidos mediante una rastra son concentradas en el lecho de secado y el agua continúa hacia el clarificador primario.

7.1.2. Tratamiento primario

7.1.2.1. *Clarificador primario*

El agua que ha recibido pretratamiento llega a los dos clarificadores primarios, en este el agua residual tiene un tiempo de retención de 120 minutos, con la finalidad de sedimentar por gravedad los sólidos más finos que posteriormente son enviados a un tratamiento de digestión aerobia de lodos para continuar con su disposición en el relleno sanitario de Izúcar de Matamoros. Luego de esto se podrá eliminar la materia orgánica soluble mediante el tratamiento secundario.

7.1.3. Tratamiento secundario

7.1.3.1. *Reactor aerobio de filtros biológicos o percoladores*

En este proceso del tratamiento el agua residual circula hacia abajo mediante un rociador rotatorio a través del empaque o limo biológico que contiene las colonias de microorganismos que pasa por ciclos de inundación mientras que el aire circula hacia arriba o hacia abajo para suministrarles oxígeno, permitiendo la digestión aerobia del agua residual. En este punto una losa perforada permite la salida del agua y la recolección del exceso de lodos.

7.1.3.2. Clarificador secundario

A continuación, el agua tratada pasa a una zona de sedimentación a través de dos sedimentadores circulares durante un tiempo de retención de 120 minutos, aquí se separan los sólidos en suspensión y los lodos biológicos generados en el filtro percolador, así como los subproductos sedimentables provenientes de la degradación biológica, los cuales se depositan en el fondo del clarificador, estos sólidos también son enviados a un tratamiento de digestión aerobia de lodos para su posterior disposición.

7.1.4. Desinfección de agua tratada

El agua tratada procedente del clarificador secundario se conduce a un tanque para su desinfección donde se le dosifica hipoclorito de sodio en solución mediante una bomba dosificadora con la finalidad de eliminar patógenos y microorganismos y finalmente es agua residual tratada es descargada en el río Nexapa.

7.1.5. Tratamiento de lodos

Los lodos son conducidos mediante bombas sumergibles desde los clarificadores primario y secundario hasta un digestor aerobio que tiene dos aireadores superficiales tipo turbina. Después los lodos adicionados con coagulante en solución se secan mediante una centrífuga con capacidad de 4 m³/h.

En la Figura 3, se puede observar el diagrama de flujo de la PTAR de Izúcar de Matamoros.

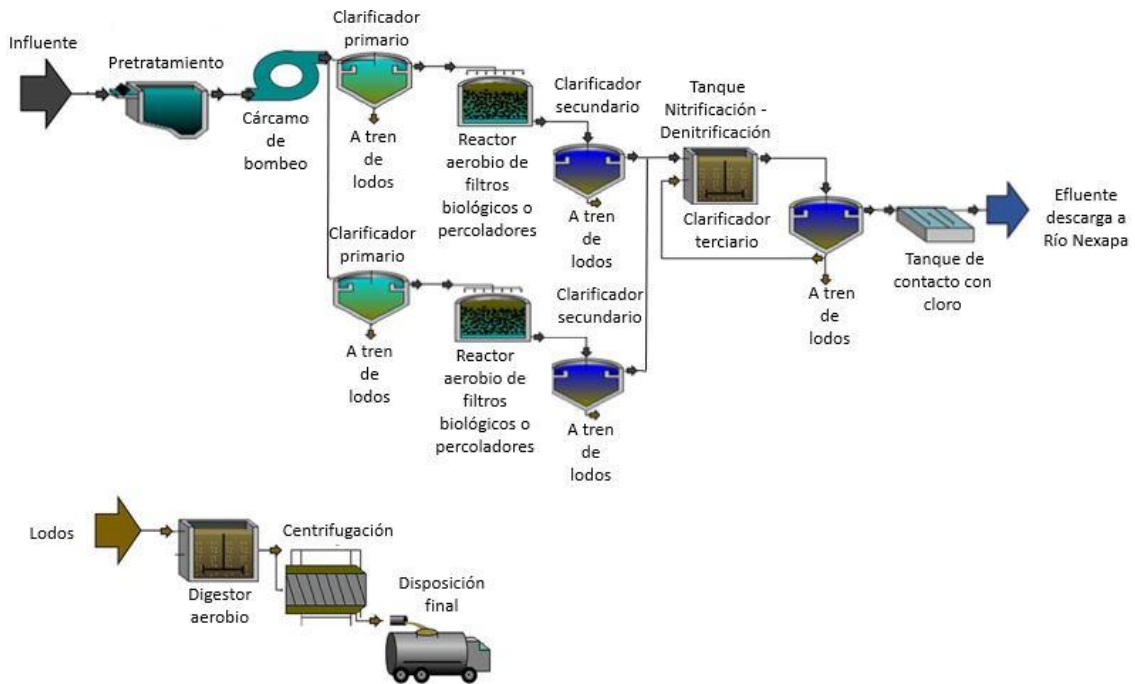
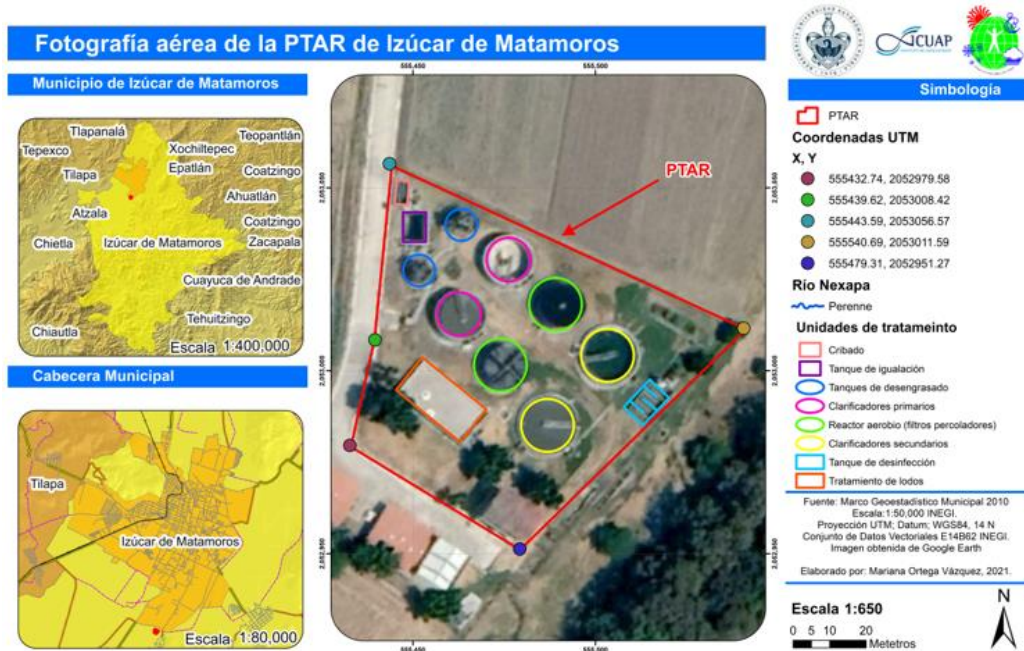


Figura 3. Diagrama de flujo de la PTAR de Izúcar de Matamoros

Adaptado de (CONAGUA, 2019).

En la fotografía aérea del Mapa 2, se puede observar el predio donde se ubica la PTAR y en el mismo se pueden apreciar las unidades de tratamiento.



Mapa 2. Fotografía aérea de la PTAR de Izúcar de Matamoros (Elaboración propia, 2021).



Fotografía 1. Distribución de los procesos de la PTAR de Izúcar de Matamoros (Onofre, 2020)

A continuación, se describen todos los elementos ecológicos, sociales, económicos e institucionales que están relacionados al desempeño de la planta de tratamiento en estudio.

7.2 Caracterización biofísica de la zona de estudio usando SIG

Para realizar la caracterización biofísica de la zona de estudio se procedió a realizar mapas temáticos, con la finalidad de que los datos representados brinden información acerca de los elementos ecológicos necesarios a considerar para resolver la problemática bajo estudio.

Los datos obtenidos a partir de la caracterización biofísica de la cabecera municipal de Izúcar de Matamoros se concentran en la Tabla 6, sin embargo, el detalle de la caracterización acompañada de sus respectivos mapas temáticos puede consultarse en el Anexo 1.

Tabla 6. Características biofísicas de la zona de estudio

Característica biofísica	Descripción	Fuente
Climatología	Clima cálido subhúmedo con lluvias en verano y seca en invierno	Guía para la Interpretación de Cartografía Climatológica (INEGI, 2005a)
Temperatura máxima promedio	Comprende de los 32 a los 36 °C	Estación meteorológica 00021132 Izúcar de Matamoros (Servicio Meteorológico Nacional, 2010)
Temperatura mínima promedio	Comprende de los 10 a los 12 °C	Estación meteorológica 00021132 Izúcar de Matamoros (Servicio Meteorológico Nacional, 2010)

Característica biofísica	Descripción	Fuente
Precipitación media anual	En el rango de los 800 a 1000 mm	Estación meteorológica 00021132 Izúcar de Matamoros (Servicio Meteorológico Nacional, 2010)
Geomorfología	Provincia fisiográfica: Eje Neovolcánico Subprovincia: Lagos y Volcanes de Anáhuac Topoforma: Valle	Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México (INEGI, 1997)
Edafología	Representada mayoritariamente por el tipo de suelo Vertisol pélico de color gris oscuro, con alta fertilidad, drenaje lento	Catálogo de metadatos geográficos de CONABIO (CONABIO - INIFAP, 1995)
Permeabilidad del suelo	Baja	
Degradación del suelo	Principalmente provocada por actividades agrícolas y sobrepastoreo que provoca la declinación de la fertilidad y productividad.	Catálogo de metadatos geográficos de CONABIO (SEMARNAT & Dirección de Geomática, 2004)
Hidrología superficial	Región hidrológica: RH-18 Río Balsas Cuenca: Río Atoyac Subcuenca: Huaquechula	Síntesis Geográfica del Estado de Puebla (INEGI, 2000)
Hidrología subterránea	Corresponde al acuífero Atlixco – Izúcar de Matamoros. La extracción del agua subterránea se destina principalmente para el uso agrícola.	Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Atlixco-Izúcar de Matamoros. (CONAGUA, 2015)
Uso de suelo y vegetación	Representado por agricultura de riego anual y semipermanente, agricultura de riego semipermanente y zona urbana construida.	Guía para la interpretación de cartografía Uso del Suelo y Vegetación Serie VI (INEGI, 2012)

Elaboración propia, 2020.

7.3 Caracterización socioeconómica del sistema de estudio

Para describir las características sociodemográficas del municipio de Izúcar de Matamoros se emplearán los datos reportados por INEGI; este organismo público autónomo, realizó el Censo de Población y Vivienda 2020 para producir información sobre la dimensión, estructura y distribución espacial, características socioeconómicas y culturales de la población, así como los aspectos de las viviendas respecto a sus materiales de construcción, disponibilidad de servicios, instalaciones, etc. Los datos descritos a continuación se elaboraron con datos publicados en el Panorama sociodemográfico de Puebla 2020 (INEGI, 2021).

7.3.1. Índice demográfico

El municipio de Izúcar de Matamoros tiene una superficie de 537 Km² y de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI su población ascendía a 82,809 habitantes que representan el 1.3% de la población estatal, siendo el 47.8% hombres y 52.2% mujeres, con una densidad de población de 154.2 hab/Km². Se considera que el municipio es urbano. Sus tres principales localidades son la cabecera municipal de Izúcar de Matamoros con una población de 49,578 habitantes, seguido de la localidad denominada San Juan Raboso con 4,241 habitantes y La Galarza con 4,076 habitantes.

La mitad de la población tiene 28 años o menos y existen 59 personas en edad de dependencia por cada 100 en edad productiva. Cabe mencionar que el promedio de hijos(as) nacidos vivos(as) es de 1.6.

7.3.2. Índice de marginación y migración

Según el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social y sus indicadores, el grado de marginación municipal publicados en el Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social era medio y el grado de rezago social municipal era muy bajo.

Los índices de migración confirman que la migración intermunicipal estaba en equilibrio y que el grado de intensidad migratoria a los Estados Unidos era alta. (CONEVAL, 2015). Según el INEGI, las principales causas de la migración son por motivos familiares en un 55.8%, un 22.4% por trabajo, el 11.8% por otra causa, el 6% para estudiar y el 4% por la inseguridad.

7.3.3. Vivienda, disponibilidad de bienes, servicios y tecnologías de información y comunicación

Según el total de viviendas particulares habitadas en el año 2020 era de 21,675 con un promedio de 3.8 habitantes por vivienda. La población del municipio de Izúcar de Matamoros tenía acceso a los siguientes servicios y equipamiento; 99.4% contaba con energía eléctrica, el 98.5% con servicio sanitario y drenaje, el 72.1% con tinaco, el 52.3% con agua entubada y 42.8% con cisterna o aljibe.

La disponibilidad de bienes se distribuye de la siguiente manera; 87.6% contaba con refrigerador, 72% con lavadora, 38% con bicicleta, 33.1% con automóvil o camioneta y el 25.6% con motocicleta o motoneta.

En cuanto a tecnologías de información y comunicación el 82.5% de la población manifestó tener teléfono celular, el 43.8% disponía de televisión de paga, 39.8% tenía una línea telefónica fija, 38.1% contaba con internet y 26.5% con computadora.

7.3.4. Actividades económicas

Cabe mencionar que la población económicamente activa equivale al 61.2%, de los cuales el 58.4% está representado por hombres y el 41.6% por mujeres. Por otra parte, la población económicamente activa está representado por el 38.5%, de los cuales 33.4% son estudiantes, 45.6% son personas dedicadas a los quehaceres del hogar, 6.6% son pensionados o jubilados, 7.1% corresponde a personas con alguna limitación física o mental que les impide trabajar y 7.4% son personas que se dedican a otras actividades no económicas.

En el Censo de Población y Vivienda 2010, quedó asentado que la distribución de la población ocupada según cada sector de actividad estaba mayormente representada por las actividades primarias y terciarias (INEGI, 2010) y para el año 2013 la distribución de las tres principales actividades de la población ocupada se reporta en la Tabla 7.

Tabla 7. Distribución de la población ocupada según su sector de actividad

Sector	Actividad	Número de personas ocupadas
Primario	Agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza.	5,212
Secundario	Construcción	1,704
	Industrias manufactureras	1,266
	Electricidad, agua y suministro de gas por ductos al consumidor final	144
Terciario	Comercio al por menor	4,782
	Otros servicios excepto actividades de gobierno	2,304
	Servicios educativos	1,826

Elaboración propia con datos de (SEDESOL, 2013).

7.3.5. Salud y discapacidad

En el año 2020, la población afiliada a servicios de salud era de 74.0%. Los servicios de salud y su cobertura se presentan en la Tabla 8:

Tabla 8. Afiliación a servicios de salud

Afiliación	Población afiliada (%)
INSABI	61.2
IMSS	24.4
ISSSTE o ISSSTE Estatal	12.4
IMSS Bienestar	1.6
Otra institución	0.6
Institución privada	0.4
Pemex, Defensa o Marina	0.2

Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2021)

Según datos de la Secretaría de Salud y su base de datos sobre defunciones 2010, la principal causa de mortalidad es la diabetes, seguida por tumores, causas externas de mortalidad que incluye accidentes de tráfico de vehículos de motor; otros accidentes de transporte; ahogamiento; sumersión y sofocación accidentales; envenenamiento; suicidio, etc., enfermedades del sistema genitourinario, enfermedades hipertensivas y enfermedades infecciosas y parasitarias (INEGI, 2010). En este municipio las personas que tienen alguna discapacidad están distribuidas de la siguiente manera según su edad; las personas con 60 años y más equivalen al 29.9%, los 30 a 59 años representan el 6%, los de 18 a 29 años el 2.9% y de 0 a 17 años tan solo el 2.6% de la población.

7.3.6. Educación y cultura

En la actualidad la tasa de alfabetización por rango de edad en el municipio es de 98.9% de los 15 a los 24 años, y del 90.1% para los habitantes de 25 años y más. La población según el nivel de escolaridad se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Población según el nivel de escolaridad

Nivel de escolaridad	Población (%)
Sin escolaridad	7.1
Básica	51.9
Media superior	22.6
Superior	18.2
No especificado	0.1

Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2021)

En el Plan Municipal de Desarrollo 2018 – 2021 elaborado por el H. Ayuntamiento de Izúcar de Matamoros (2018) se menciona que el municipio cuenta con 6 escuelas de nivel inicial, 61 de nivel preescolar, 64 primarias, 36 secundarias, 30 bachilleratos, 5 de formación para el trabajo y 10 de nivel superior que incluyen normales y técnicas. Mientas que en la cabecera municipal existen 104 escuelas de educación básica, 40.3% de nivel escolar, 38.8% de nivel primaria y 20.9% de nivel secundaria, según el censo de escuelas, maestros y alumnos de la SEP.

En el municipio existe un déficit de infraestructura cultural y no existen programas de fomento y formación cultural para la sociedad, por lo que no existen escenarios, teatros, salas de cine ni salones de exposición.

7.3.7. Etnicidad

En el Municipio solo el 0.7% de la población habla una lengua indígena, el 1.47% no habla español, pero si habla una lengua indígena, siendo las lenguas más frecuentes el Náhuatl y el Mixteco.

7.3.8. Infraestructura social

El Municipio está compuesto por una cabecera municipal y 65 localidades, de las cuales sólo una es mayor a 15,000 habitantes, seis son mayores a 2,500 habitantes y el resto en localidades menores a los 2,500 habitantes. Esto quiere decir que la cabecera municipal concentra el 59.1% de la población, otras seis localidades concentran el 25.9% y el resto el 15%. Lo que significa que Izúcar de Matamoros, se caracteriza por tener una población mayoritariamente urbana. Esto quiere decir que el municipio tiene un alto riesgo de conurbación en el mediano plazo y no ha considerado las reservas territoriales para vivienda, industrial o equipamiento para afrontar el crecimiento que requerirá el aumento de su mancha urbana.

7.4 Descripción del contexto socio-institucional

7.4.1. Convenios e iniciativas internacionales

La estrategia internacional conocida como Convenio de Estocolmo contribuye a entender y resolver el problema ambiental generado por los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP), esto se debe a que estas sustancias químicas orgánicas poseen propiedades fisico-químicas que, una vez liberados en el medio ambiente causan diversos efectos en los organismos tales como toxicidad crónica, disrupción endocrina y bioacumulación; mientras que en el ambiente se caracterizan por ser

resistentes a la degradación, bioacumulables y por su potencial para transportarse a larga distancia, pudiendo llegar a regiones en las que nunca se han producido o utilizado (Ministerio para la Transformación Ecológica., 2012). Este convenio promueve las mejores prácticas y tecnologías disponibles con el propósito de reducir o eliminar la producción, utilización, importación y exportación de productos que contengan COP, a través del fortalecimiento de las legislaciones nacionales y la instrumentación de Planes Nacionales de Implementación (PNI), para cumplir los compromisos que, en el año 2001, alrededor de 151 países firmaron en el Convenio de Estocolmo, mismo que entró en vigor en el año 2004. Actualmente los PNI se reconocen como el instrumento rector de la política sobre los contaminantes, dado que fue diseñado para identificar y caracterizar las actividades que originan los COP y adoptar medidas efectivas, factibles y aceptables (SEMARNAT, 2007).

México firmó el convenio en el año 2001 y lo ratificó en el 2003. Buscando cumplir con los compromisos que establece el Convenio, integró sus Planes Nacionales de Implementación (PNI) en el año 2007, mismos que fueron elaborados por la Dirección General de Gestión integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR), que pertenecía a la Subsecretaría de Gestión de la Protección ambiental, de la SEMARNAT y aprobados por el Comité Nacional de Coordinación de México en el 2008.

El gobierno mexicano actualizó y registró su PNI, ante el Secretariado del Convenio en su versión 2016, con el fin de ratificar su voluntad para cumplir con los compromisos adquiridos, poner en práctica las medidas pertinentes para lograr objetivos, y hacer las comparaciones de las acciones implementadas antes y después de su firma.

El PNI estuvo diseñado para facilitar la implementación de estrategias y acciones que permitiesen consolidar logros, superar rezagos, y enfrentar desafíos para hacer un adecuado inventario y control de los COP industriales y los COP no intencionales. Este plan, además, incorporó acciones de carácter jurídico, y de comunicación para asegurar la participación informada de los diversos actores involucrados. No obstante, uno de los desafíos más grandes para México es la escasa información existente sobre los productos de consumo que contienen a estas sustancias, sin que esto sea del conocimiento de los consumidores ni de las autoridades, lo que invita a hacer efectivo el principio de responsabilidad compartida pero diferenciada, donde cada actor debe cumplir con sus atribuciones y obligaciones para consolidar los avances y alcanzar los fines del Convenio.

Además, el PNI identificó las instituciones y las colaboraciones que existen en México para vigilar la presencia de COP en el país y para dar sustento al desarrollo de instrumentos de política pública, incluyendo estrategias de programas multisectoriales relacionadas con su manejo, que permita dar trazabilidad de su existencia, comercialización, uso y disposición final e impacto, su comunicación oportuna y la estimación de costos considerando recursos humanos, materiales y financieros. En este caso en particular, se cuenta con los financiamientos de cooperación regional o de organismos internacionales como *Global Environmental Facility* (GEF), *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), *Japan International Cooperation Agency* (JICA), los programas de la ONU (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), la cooperación regional de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) y acuerdos bilaterales de cooperación con otros países, como lo son; Estados Unidos y Canadá (SEMARNAT, 2016).

En contraste con lo anterior, no podemos omitir que en la actualización del PNI del Convenio de Estocolmo, realizada entre el 2015 y el 2016, se enfatizó la necesidad de llevar a cabo una adecuación estratégica del régimen jurídico de las sustancias químicas; esta se aprobó por el Comité Nacional Coordinador (conformado por varios de los integrantes del Comité Nacional Consultivo) pero lamentablemente dicho plan no ha sido publicado, ni existen iniciativas para mejorar el marco regulatorio de las sustancias químicas (PNUD México, 2018).

Respecto a la contaminación del agua de manera general, una iniciativa adoptada por la Asamblea General de la ONU, conocida como la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, estableció, en el 2015, 17 Objetivos de Desarrollo Sustentable, conocidos por las siglas ODS, que comprenden 169 metas en las esferas económica, social y ambiental. De los objetivos propuestos, pondremos especial atención en el ODS 6, que se refiere a “garantizar la disponibilidad del agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos”, acompañado de la meta 6.3, que establece que es necesario “mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial”, así como de la meta 6.b, que señala la necesidad de “apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento”. Para lograr estos objetivos se debe tomar en cuenta que en México estos objetivos

tienen un alcance federal, estatal y municipal. A continuación, se describe el marco legal nacional relacionado a la contaminación del agua, incluida aquellas relacionadas a los COP.

7.4.2. Marco legal nacional

Aunque en México existen normativas que tienden un puente entre las metas sociales de calidad del agua y los límites de descarga específicos, conocidas como: NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, se detectó que no existe una NOM específica para establecer los límites máximos permisibles en las descargas para regular los COP. Y por otra parte, la NOM-127-SSA1-1994 se denomina *“Salud ambiental, agua para uso y consumo humano - límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”*. Y establece los límites máximos permisibles para algunas sustancias que han sido listadas dentro de los COP, que deben ser eliminados o restringidos prioritariamente según lo establecido en el Convenio de Estocolmo, las cuales son: aldrín, dieldrín, clordano, DDT, hexaclorobenceno, heptacloro. Así como otras sustancias que son candidatas para incluirse en el Convenio como es el caso de: lindano, fenoles o compuestos fenólicos (Secretaría del Convenio de Estocolmo, 2010). Conviene subrayar que dicha norma no es aplicable para plantas de tratamiento de agua residual.

No obstante, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) publicada en el año 2003, considera a los Contaminantes Orgánicos Persistentes, dentro de las sustancias químicas que deben ser atendidas por los riesgos que implican para la salud humana y para el medio ambiente, por lo que en su Art.31, fracción X establece *que “estos están sujetos a un plan de manejo”*. A su vez en su Art. 60 indica que *“los responsables de procesos de tratamiento de residuos peligrosos en donde se lleve a cabo la liberación al ambiente de una sustancia tóxica, persistente y bioacumulable, estarán obligados a prevenir, reducir o controlar dicha liberación”*. Y en su Art. 67, fracción III prohíbe su confinamiento en concentraciones superiores a 50 ppm y su dilución con el fin de que se alcancen los límites máximos y en este mismo artículo fracción IX, prohíbe su incineración; *“siempre y cuando exista en el país alguna otra tecnología disponible que cause menor impacto y riesgo ambiental”*. Del mismo modo, en el Art. 86, fracción II dispone que *“En ningún caso se autorizará la importación de residuos que sean o estén constituidos por compuestos orgánicos persistentes”* (Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos., 2003).

7.4.3. Marco legal del Estado de Puebla (Leyes y Planes)

En el Estado de Puebla las leyes que se encargan de asignar competencias, definir y regular las descargas y los sistemas de tratamiento de aguas y los servicios de agua potable son la Ley Orgánica de la Administración Pública del Estado de Puebla, y la Ley de Aguas para el Estado de Puebla.

En el Plan de Estatal de Desarrollo de Puebla con vigencia del año 2019 al año 2024, se establecen estrategias que den respuesta a las principales necesidades y retos detectados en la entidad, buscando contribuir al cumplimiento de los 17 ODS. A pesar de esto, un hallazgo importante de este trabajo es que en el Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019, no existen indicadores que nos permitan conocer la situación actual del cumplimiento del Estado de Puebla con respecto al ODS 6. Asimismo, en este plan estatal se documenta que, de los 217 municipios del Estado, solo 25 cuentan con un organismo operador de agua, y que de las 200 plantas de tratamiento de agua residual instaladas el 70% no se encuentran en operación o no cumplen con la normatividad vigente (Gobierno de Puebla, 2019).

7.4.4. Plan Municipal de Desarrollo (PMD)

El PMD de Izúcar de Matamoros para el periodo del 2018 al 2021 considera que la participación ciudadana es pieza clave para la elaboración de diagnósticos de causas - efectos y para ejecutar acciones que contribuyan a alcanzar los 17 ODS (H. Ayuntamiento de Izúcar de Matamoros., 2018). No obstante, en el Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019 de este municipio no existen indicadores que nos permitan conocer el estado actual del cumplimiento del municipio de Izúcar de Matamoros, con respecto al ODS 6. Aunque, con el fin de alinear acciones y dar cumplimiento con este objetivo el PMD ha definido los siguientes programas:

- Programa 11: Obras de infraestructura básica para el bienestar social, en la que una de sus líneas de acción es “Ampliar la infraestructura básica municipal para combatir el rezago social (por sí o en coordinación con Gobierno del Estado y/o convenios federales)” poniendo especial atención en la provisión de agua, drenaje y alcantarillado.
- Programa 12: Eficiente prestación de servicios públicos, con la finalidad de “Proporcionar servicios públicos eficientes y de calidad e incluyentes con enfoque de sustentabilidad dentro

del marco legal”. Este programa involucra a la Dirección del Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Izúcar de Matamoros (SOSAPAMIM).

- Programa 23: Sustentabilidad y ecología, en la que una de sus líneas de acción es “Impulsar acciones encaminadas al tratamiento de aguas residuales”.

Adicionalmente en esta búsqueda de información se revisaron también los asuntos turnados, las iniciativas de leyes presentadas, junto con los decretos de reforma o adición a las disposiciones legales ya establecidas, los programas de trabajo y acuerdos que integran la agenda de la Comisión de Medio Ambiente, Sustentabilidad, Cambio Climático y Recursos Naturales de la LXIV Legislatura de la Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Teniendo como resultado que el tema de la contaminación del agua residual por COP no está asentado dentro de las prioridades de la agenda pública, por lo que se considera que la falta de información sobre los COP y su impacto negativo hacia los seres vivos y el medio ambiente está relacionado con las lagunas legislativas en materia de COP dentro del territorio nacional, y la falta de presión social que demande la regulación de estos compuestos que son producidos, distribuidos y desechados diariamente en nuestro país.

7.4.5. Estructura institucional del Sistema Operador de la PTAR de Izúcar de Matamoros

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), es la encargada de regular los servicios de agua potable en México. En el artículo 115 de la Constitución señala que los municipios podrán operar los servicios de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de las aguas residuales mediante órganos descentralizados. La tarea de estos es prestar servicios relacionados con el agua, participar en coordinación del gobierno federal y el gobierno estatal de acuerdo con sus atribuciones y responsabilidades, planear y programar su operación, realizar obras de infraestructura hidráulica, su operación y mantenimiento y adoptar las medidas necesarias para tener autosuficiencia financiera.

Más aún del ámbito federal, la CONAGUA convoca a los gobiernos estatales a actualizar la su legislación sobre agua potable y a establecer su propia organización y a establecer sus propios sistemas financieros (Comisión Nacional del Agua Mexico, 2019).

Los organismos operadores por otro lado, tienen atribuciones y encomiendas variables (de acuerdo con cada Ley Estatal). Los organismos operadores pueden ser:

- Municipales: La atribución de prestar el servicio tanto en zonas urbanas como rurales es del ayuntamiento.
- Intermunicipales: Cuando las localidades o municipios limítrofes o conurbados comparten infraestructura hidráulica.
- Estatales: Cuando se cuenta con un organismo público descentralizado del gobierno del Estado para administrar los servicios de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de las aguas residuales dentro de la entidad.
- Privados como concesionarios: Participa el sector social y privado en la prestación de los servicios de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de las aguas residuales.

En el caso de SOSAPAMIM, el sistema operador de Izúcar de Matamoros, es un Organismo Descentralizado de la Administración Pública del mismo municipio, al que conforme al Artículo 115 de la Constitución y al Artículo 10 de la Ley de Agua para el Estado de Puebla, le corresponde prestar los servicios de agua potable, drenaje, drenaje, alcantarillado y saneamiento. Mismo que cuenta con personalidad jurídica y patrimonio propio conforme al decreto publicado en el Periódico Oficial del Estado de Puebla, el 11 de octubre de 1994. Actualmente el director general de SOSAPAMIM es el Lic. Justiniano Ruíz Tirado (SOSAPAMIM, 2020). Como se mencionó anteriormente, la planta de tratamiento de aguas residuales está a cargo de SOSAPAMIM y se encuentra en operación desde el año 2008. Cabe señalar que actualmente la operación de la PTAR está a cargo de cuatro trabajadores y un velador.

7.5 Indicadores fisicoquímicos del efluente de la PTAR de Izúcar de Matamoros

A continuación, se reportan los parámetros fisicoquímicos correspondientes a los valores reportados por García (2019), mismos que fueron obtenidos en el efluente de la PTAR de Izúcar de Matamoros. En la Tabla 10 se pueden observar los valores obtenidos en 3 muestreos que corresponden a diferentes estaciones de año.

Tabla 10. Parámetros fisicoquímicos del efluente de la PTAR de Izúcar de Matamoros

Efluente PTAR			
Parámetro	Muestreo 1 (junio del 2018)	Muestreo 2 (enero del 2019)	Muestreo 3 (mayo del 2019)
DQO (mg/L)	195	1153	430.00
DBO (mg/L)	52	175	50.00
pH	7.85	7.4	8.21
Conductividad (µS/cm)	1524	2260	2290.00
Sólidos disueltos (mg/L)	668.5	1110	1450.00
Cloro libre (mg/L)	0.08	0.16	0.00
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	45	98	150.00
Níquel Ni ²⁺ (mg/L)	0.066	0.17	0.29
Calcio Ca ²⁺ (mg/L)	130	190	200.00
Magnesio Mg ²⁺ (mg/L)	35	65	SD
Hierro Fe ³⁺ (mg/L)	0.585	0.995	SD
Nitratos			
NO ₃ -N (mg/L)	13.2	100	26.00
NO ₃ ¹⁻ (mg/L)	60	435	120.00
Fosfatos			
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	1.77	27	24.00
P (mg/L)	0.45	9	8.00
P ₂ O ₅ (mg/L)	1.41	20	18.00

Con datos de (García, 2019).

Adicionalmente, como se mencionó anteriormente desde el año 2006 hasta el año 2019 han sido reportados alrededor de 300 contaminantes orgánicos persistentes y emergentes como productos de cuidado personal entre los que destacan fragancias como galaxolide, tonalide y protectores solares, fármacos y derivados de alquilfenoles, estimulantes como la cafeína y algunos otros compuestos de uso industrial.

7.6 Implementación del marco DPSIR para la PTAR en estudio

Se procedió a organizar la información recopilada anteriormente en entradas en el marco DPSIR, cuya implementación nos permite reconocer algunas de las interacciones ambientales y sociales en el sistema de estudio. En este marco se pueden organizar, clasificar y desarrollar los hallazgos relacionados con el desempeño ambiental de la PTAR, lo que es útil para determinar las

relaciones, causas y efectos entre los factores ambientales y los sociales, con la finalidad de facilitar la toma de decisiones. Es importante recalcar que este análisis es de carácter cualitativo, y que está limitado por la información disponible, por lo que resulta en un primer acercamiento a la complejidad del sistema de estudio.

La implementación del Marco inicia con la identificación de las Fuerzas Motrices, es decir, los factores sociales, económicos y las actividades humanas alrededor de la PTAR que originan Presiones ambientales y de comportamiento humano en la zona de estudio, lo que provoca un cambio generalmente no deseado en el Estado del medio ambiente, en la comunidad y en los individuos; este Estado induce a la aparición de Impactos sobre los servicios ecosistémicos y el bienestar humano de los habitantes de la cabecera municipal y sus colindancias. El Marco finaliza con una serie de propuestas que resultan en Respuestas, que al aplicarse de manera articulada entre tomadores de decisiones sirven para mejorar el desempeño de la PTAR, estas Respuestas o Intervenciones van dirigidas hacia las Fuerzas Motrices, las Presiones, el Estado y a los Impactos.

7.6.1. Fuerzas Motrices

Las Fuerzas Motrices económicas identificadas en la zona de estudio, y reportadas en la Tabla 11, se relacionan con el suministro de agua potable en la cabecera municipal, que va al alza con tendencia a rebasar la capacidad instalada de la PTAR para darle un adecuado tratamiento a toda el agua residual generada. Otra Fuerza Motriz relacionada es el fenómeno de urbanización de la zona de estudio que provoca el aumento de la demanda de servicios de agua potable, drenaje y saneamiento. Por otro lado, la aplicación de productos químicos en fuentes fijas carece de regulación, lo que ocasiona que las aguas residuales procedentes de hospitales, veterinarias, clínicas de belleza, talleres mecánicos, restaurantes, rastros, puedan contener compuestos orgánicos persistentes, y en general una alta carga orgánica. Además, como es usual en el país, en el sistema de drenaje se mezclan el agua residual de procedencia domiciliaria, comercial e incluso pluvial.

En cuanto al tema relacionado con la regulación en materia de agua en la PTAR se ha identificado que no se cumple cabalmente con la normatividad aplicable, no se opera de manera constante ni se cuenta con programas de mantenimiento o capacitación.

En la identificación de las Fuerzas Motrices sociales, se debe destacar que dentro de la dinámica familiar y social hay poca acción participativa y que actualmente el manejo y las decisiones

implementadas dentro de la PTAR le corresponden a un organismo descentralizado denominado SOSAPAMIM, que hasta ahora no mantiene comunicación con otros tomadores de decisiones de la cabecera municipal. Se resumen a continuación las Fuerza Motrices identificadas en la zona de estudio.

Tabla 11. Fuerzas Motrices encontradas para la PTAR en estudio

DPSIR	Fuerzas Motrices
FM.1	Suministro de agua potable: Gasto medio de 134 L/s, Colectores están diseñados para desalojar un caudal de hasta 165 L/s. Capacidad instalada en la PTAR: Hasta 90 L/s, sin embargo, solo recibe alrededor de 60 L/s (UNAM, 2010a).
FM.2	Crecimiento gradual pero constante de la vivienda en el municipio que demanda servicios de dotación de agua potable, drenaje y tratamiento de agua residual. (H. Ayuntamiento de Izúcar de Matamoros., 2018).
FM.3	El sistema de drenaje capta el agua residual proveniente de diversas fuentes de COP tales como hospitales, veterinarias, clínicas de belleza, talleres mecánicos, restaurantes, rastros, etc.
FM.4	La regulación existente es insuficiente y no se implementa. (García, 2019)
FM.5	Una encuesta realizada en el municipio demostró que dentro de la población hay poca acción participativa. (UNAM, 2010b)
FM.6	El manejo de la PTAR está a cargo de un organismo descentralizado No hay articulación entre los tomadores de decisiones. (SOSAPAMIM, 2020).

(Elaboración propia, 2021).

7.6.2. Presiones

En el caso de las Presiones ambientales, encontramos la descarga de agua residual de fuentes puntuales, que sin tener un tratamiento previo en el sitio donde se generan llegan al influente de la PTAR; de acuerdo a estudios previos, en el influente se han hallado alrededor de 300 COP, por lo que la PTAR resulta ser un punto de concentración de estas sustancias; dada las condiciones y tecnología existente en esta PTAR, los COP llegan al río Nexapa, pudiendo alcanzar otros compartimentos ambientales por sus características de persistencia, volatilidad, bioacumulación y toxicidad.

Dentro de las Presiones de comportamiento humano, se ha identificado que los patrones de consumo de agua rebasan la capacidad de los servicios que puede prestar la cabecera municipal, ya

que actualmente se cuenta con más tomas de agua potable que conexiones a drenaje; aunado a esto, se identificó que en la población no se implementan acciones para ahorrar agua en sus domicilios. El reporte de estas Presiones se reporta en la Tabla 12.

Tabla 12. Presiones encontradas para la PTAR en estudio

DPSIR	Presiones
P.1	El influente de la PTAR consta de una mezcla de agua residual de fuentes puntuales (de procedencia domiciliaria, comercial, de servicios y pluvial), sin que estos reciban un tratamiento particular en su punto de descarga.
P.2	Alrededor de 300 COP llegan a la PTAR y han sido reportados por (García, 2019; Herrera, 2016; Navarro, A., Herrera, 2006) Navarro (2006), Herrera (2016) y García (2019).
P.3	El patrón de consumo de agua potable va al alza con tendencia de rebasar la capacidad y la tecnología instalada en la PTAR. (UNAM, 2010a).
P.4	La población no implementa con regularidad acciones para ahorrar agua. (UNAM, 2010b)

(Elaboración propia, 2021).

7.6.3. Estados

Conocer el Estado ambiental abiótico que incluye factores como el clima, el régimen de lluvias, la precipitación anual, las características del suelo, así como los regímenes de extracción de agua es determinante para conocer la viabilidad de las intervenciones tecnológicas y a su vez para inferir sobre las posibles afecciones que la contaminación del agua y los COP ejercen sobre los diferentes compartimentos ambientales alrededor de la PTAR.

La calidad del agua tanto en el influente como en el efluente de la PTAR reflejan el Estado de la administración, del mantenimiento y de la operación de esta, y al mismo tiempo, la pertinencia de intervenciones tecnológicas y operativas necesarias para cumplir con criterios que regulan el vertimiento de agua residual tratada en el río Nexapa. Por estudios previos, y resultado de este mismo, se identificó que actualmente la PTAR no opera constantemente, y la tecnología y condiciones de operación implementadas no son adecuadas para la remoción de los contaminantes regulados y emergentes.

En cuanto al Estado del sistema humano se ha observado que existe una saturación de la capacidad de los servicios públicos debido a la urbanización y en cuestión de salud pública se ha

identificado que el contacto con agua contaminada impacta negativamente tanto a nivel individual como comunidad. A continuación, en la Tabla 13 se resume el Estado del sistema de estudio.

Tabla 13. Descripción del Estado de la PTAR en estudio

DPSIR	Estados
E.1	<p>Los factores biofísicos son determinantes para conocer la viabilidad de las intervenciones tecnológicas.</p> <p>Útiles para inferir sobre las posibles afecciones que la contaminación de agua y los COP están ejerciendo sobre los diferentes compartimentos ambientales en la zona de estudio.</p>
E.2	<p>La calidad del influente a la PTAR ha demostrado tener valores de DQO que rondan los 1153 mg/L de O₂ y una DBO de aproximadamente 175 mg/L de O₂.</p> <p>La caracterización fisicoquímica del agua residual tratada reportada por García (2019) revela que no se cumple con todos los parámetros que exige la NOM-001-SEMERNAT-1996 para ser vertida en el río Nexapa. Este inconveniente se ve reflejado en la aparición de malos olores y fauna nociva en las colindancias de la PTAR.</p>
E.3	<p>Actualmente la PTAR no opera de manera constante, esto debido a la falta de recursos económicos para llevar a cabo su mantenimiento y la capacitación del personal.</p> <p>La tecnología actualmente implementada en la PTAR no es suficiente para lograr la remoción de los COP que llegan a su influente.</p> <p>La capacidad instalada de la PTAR es insuficiente para tratar la totalidad de descargas de drenaje (parte se vierte directamente al río).</p>
E.4	<p>Según datos de la Secretaría de Salud, dentro de las principales causas de mortalidad se encuentran las enfermedades infecciosas y parasitarias (INEGI, 2010), mismas que pueden atribuirse a la contaminación del agua.</p>
E.5	<p>El municipio se caracteriza por tener una población mayoritariamente urbana y actualmente existe un fenómeno de urbanización lo que representa una saturación de la capacidad de los servicios públicos. (H. Ayuntamiento de Izúcar de Matamoros., 2018).</p>
E.6	<p>Las enfermedades infecciosas como la tifoidea, disentería, gastroenteritis y cólera están asociadas con el contacto del agua contaminada que contiene microorganismos patógenos (Secretaría de Salud, 2015).</p>

(Elaboración propia, 2021).

7.6.4. Impactos

En la Tabla 14 se identificaron diversos Impactos a los bienes y servicios ecosistémicos derivados del funcionamiento limitado de la PTAR; sin embargo, los Impactos reportados son de carácter observacional, ya que la búsqueda de información no proveyó de elementos cuantitativos

como para establecer de manera sólida la magnitud del impacto generado. Por ello, los siguientes Impactos son meramente una descripción potencial del efecto en el ecosistema y en la salud humana. Primero, la calidad del efluente de salida de la PTAR indica que diversos contaminantes que escapan al tratamiento (incluyendo COP) son vertidos al río y por medio del riego o el mismo ciclo del agua, estos contaminantes llegan otros compartimentos como la atmósfera y el suelo, y en consecuencia a los cultivos, incluso aquellos que se encuentren alejados de la zona de estudio, lo que a su vez impacta también la salud de los ecosistemas y los seres vivos. Adicionalmente la contaminación del río ha afectado el valor estético del paisaje y con esto ya no se considera un lugar seguro para llevar a cabo actividades recreativas en sus colindancias.

En cuanto a los Impactos relacionados con el bienestar humano y capacidad de trabajo se ha identificado que el personal administrativo y operativo de la PTAR es insuficiente por lo que este inconveniente está relacionado con la incapacidad de garantizar la calidad del efluente. Hay que mencionar, además, que el saneamiento inadecuado del agua residual genera una sobrecarga del sector salud, sin embargo, el costo asociado a esta problemática no se encuentra reportado dentro de la zona de estudio.

Tabla 14. Impactos provocados por la PTAR en la zona de estudio

DPSIR	Impactos
I.1	La limitada funcionalidad de la PTAR resulta en una baja la calidad del efluente que se vierte, contaminando al río Nexapa, lo que significa que la irrigación de los cultivos y en consecuencia del suelo con agua proveniente del río provoca su contaminación con COP, entre otros.
I.2	La calidad del agua que llega al influente de la PTAR responde a variaciones en la concentración de los contaminantes, esto se debe tanto a factores antropogénicas como son las descargas clandestinas que deben ser reguladas, como a factores ambientales tales como el clima y la precipitación. Por otro lado, la limitada funcionalidad de la PTAR y su diseño actual resulta en el incumplimiento de la normatividad aplicable vigente.
I.3	Derivado de la contaminación del río Nexapa, el valor estético del paisaje se ha visto afectado, ya que por las condiciones actuales como el mal olor y la proliferación de fauna nociva. Adicionalmente no se considera un lugar seguro para realizar actividades recreativas.

DPSIR	Impactos
I.4	Por sus características de persistencia y movilidad los COP están presentes en el ciclo del agua y por esta razón pueden llegar a contaminar sitios alejados de la zona de estudio y llegar a contaminar compartimentos ambientales diferentes al agua, asimismo pueden causar enfermedades en los seres vivos.
I.5	El personal que se encarga de la operación de la PTAR es limitado, y toma decisiones desarticuladas, esto provoca que la PTAR no cumpla con su papel en la mitigación de la contaminación.
I.6	El saneamiento inadecuado de agua en México genera una sobrecarga del sector salud con un costo económico asociado que asciende a 5 800 millones de dólares al año (Agenda 2030, 2017). Sin embargo, no se tiene el dato particular para la zona de estudio

(Elaboración propia, 2021).

7.6.5. Respuestas

Una vez que se han identificado los factores de los componentes del DPSIR se ha descrito y evaluado con los elementos disponibles el entorno de la PTAR se propone una serie de Respuestas que buscan reducir las Presiones, mejorar el Estado y minimizar los Impactos, asimismo, la identificación de los elementos disponibles de la cadena causal permitiría comunicar y articular la toma de decisiones involucrando a los sectores gubernamentales, a las instituciones públicas y privadas, a los sectores educativos, culturales, de salud y a la comunidad en general. Estas partes interesadas deberán reunirse, involucrarse y cooperar para formar planes de trabajo, ya que las decisiones deben ser tomadas y evaluadas en conjunto para evitar la realización de intervenciones independientes que incluso pueden llegar a contraponerse.

Como se puede observar en la Tabla 15 las Respuestas dirigidas a las Fuerzas Motrices tienen que ver con la aplicación de políticas de construcción que regulen los asentamientos humanos, y que sean el eje rector del ordenamiento territorial para controlar el crecimiento poblacional y asegurar una gestión sustentable del recurso hídrico desde su distribución hasta su reutilización; también se requiere de la creación e implementación de políticas culturales, que promuevan en la población los temas de educación ambiental, ahorro de agua y prevención de enfermedades provocadas por el contacto o consumo de agua contaminada.

Además, se requiere la implementación de herramientas que sirvan de apoyo para tener un entendimiento compartido de la problemática y para la toma de decisiones informadas, considerando que la evaluación de la información resulta útil para realizar programas de monitoreo, para mapear,

cuantificar o rastrear indicadores actuales y futuros, que serán la métrica clave para determinar el éxito, las fortalezas y las debilidades de las intervenciones asociadas a la PTAR.

Por otro lado, las Respuestas dirigidas a las Presiones se enfocan en la aplicación correcta de la NOM-001-SEMARNAT.1996, lo que contribuiría en el funcionamiento correcto de la PTAR. Adicionalmente es deseable que esta norma sea actualizada para que se consideren dentro de ella los contaminantes químicos y biológicos que actualmente no son monitoreados. Ambos aspectos relacionados con la norma ambiental impulsarían que el desempeño técnico de la PTAR funcione adecuadamente en su papel de mitigación de la contaminación. Esto implicaría también que se implementen programas de mantenimiento permanentes, la capacitación continua del personal y el monitoreo permanente de los parámetros establecidos en la norma.

Para dar Respuestas a los Estados, la planeación comunitaria es una medida necesaria para que la población realice buenas prácticas de prevención de la contaminación, se promueva el uso de productos biodegradables, y se reduzcan o se denuncien las descargas clandestinas, y se tome conciencia sobre el perjuicio de estas. Otra respuesta que se propone es llevar a cabo la documentación de las enfermedades asociadas a la mala calidad del agua y los tratamientos aplicados para combatirlas, ya que actualmente no se cuenta con esta información que bien podría reforzar la pertinencia de todas las intervenciones propuestas alrededor de la PTAR.

Y finalmente las Respuestas ante los Impactos se relacionan con el monitoreo de la calidad del agua desde la fuente o punto de descarga, el monitoreo de las decisiones implementadas, la mitigación de las cargas sobre las personas o el medio ambiente, de la estimación del costo – beneficio de las decisiones potenciales o implementadas en los diferentes sectores incluyendo, el gubernamental, el de salud, el educativo y el académico.

Tabla 15. Descripción de las Respuestas propuestas del sistema de estudio

DPSIR	Dirigidas hacia	Respuestas
R.1	Fuerzas Motrices	Políticas de construcción: Contar con políticas de construcción y ordenamiento territorial. Competencia: Municipio
R.2		Políticas culturales: Educación ambiental, divulgación capacitación y demostración. Competencia: Comunidad, sector educativo, Municipio, ONG.
R.3		Herramientas de apoyo para la toma de decisiones: Desarrollar modelos, análisis estadísticos, geoespaciales, costo-beneficio. Junto con prácticas integradoras entre los tomadores de decisiones. Competencia: Comunidad, sector gubernamental, educativo, académico.
R.4	Presiones	Limitación a descargas: Aplicar y actualizar la normatividad vigente a las descargas de las diferentes fuentes. Competencia: SOSAPAMIM, Vigilancia autoridades competentes en materia de agua (gubernamentales).
R.5		Alcance y educación: Proporcionar información para mejorar comportamientos respecto a la gestión del agua Competencia: Sector educativo, Municipio, ONG, comunidad.
R.6		Tecnología mejorada: Optar por una actualización de la PTAR, tanto en su diseño como en su capacidad instalada. Competencia: Estado (incluyendo colindantes), Municipio, SOSAPAMIM, Sector académico, Sector empresarial.
R.7	Estados	Planeación comunitaria: Asistir al propietario para implementar ecotecnias y buenas prácticas de uso de agua. Establecer programas permanentes de mantenimiento de los equipos y capacitación del personal. Competencia: Comunidad, Municipio, SOSAPAMIM, sector educativo, académico y de salud.
R.8		Tratamientos médicos: Documentar las enfermedades registradas asociadas a la mala calidad del agua y su respectivo tratamiento médico. Competencia: Sector salud
R.9	Impactos	Monitoreo: De la calidad del agua y establecer criterios de calidad desde la fuente. Establecer una disposición adecuada de los residuos generados en la PTAR. Competencia: Comunidad, SOSAPAMIM, Vigilancia autoridades competentes en materia de agua (gubernamentales).

DPSIR	Dirigidas hacia	Respuestas
R.10		<p>Monitoreo: Del éxito de decisiones implementadas (normatividad, tecnología). Competencia: Comunidad, SOSAPAMIM, Vigilancia autoridades competentes en materia de agua (gubernamentales), sector académico y de salud.</p>
R.11		<p>Mitigación: Las cargas sobre las personas o el ambiente por pérdida de beneficios Competencia: Comunidad, sector gubernamental, educativo, académico.</p>
R.12		<p>Estimación del mérito monetario: De las decisiones potenciales o implementadas: Competencia: Comunidad, sector gubernamental, de salud, educativo, académico.</p>

(Elaboración propia, 2021).

Las Respuestas anteriormente presentadas son dirigidas para resolver los efectos de las Fuerzas Motrices, las Presiones, el Estado ambiental y humano alrededor de la PTAR y para mitigar el efecto de los Impactos sobre los servicios ecosistémicos y el bienestar humano. Cabe resaltar que las Respuestas no son unidimensionales ya que algunas de estas tienen la capacidad de influenciar también sobre otros elementos causales, generando así una serie de beneficios que impactan positivamente sobre toda la cadena de causas y efectos relacionados con el desempeño de la PTAR. En el Anexo 2 pueden consultarse las relaciones causales encontradas a partir de la aplicación del marco DPSIR en la zona de estudio.

En análisis cualitativo presentado es una primera aproximación a la complejidad de la problemática asociada a la PTAR. La lógica del DPSIR es en extremo sencilla, pero de gran utilidad para el análisis de los vínculos que existen entre las condiciones ambientales y las actividades humanas, lo que facilita la comunicación y comprensión de los elementos y sus interacciones asociadas, a las personas involucradas como tomadores de decisiones, pobladores, académicos, organizaciones. La figura 4 representa una “instantánea” de la complejidad del problema, el cual aún debe estudiarse desde el enfoque de su dinámica en el tiempo, para determinar flujos de información, materia o energía fluctuantes, que inciden en el efecto de las Respuestas que se proponen. Además, la falta de información y estadísticas resulta un reto mayor a superar, y que condiciona el alcance del análisis. Finalmente, es importante recalcar, que el análisis DPSIR permite identificar y generar los indicadores que deberán ser monitoreados para evaluar la calidad de las intervenciones que se proponen.

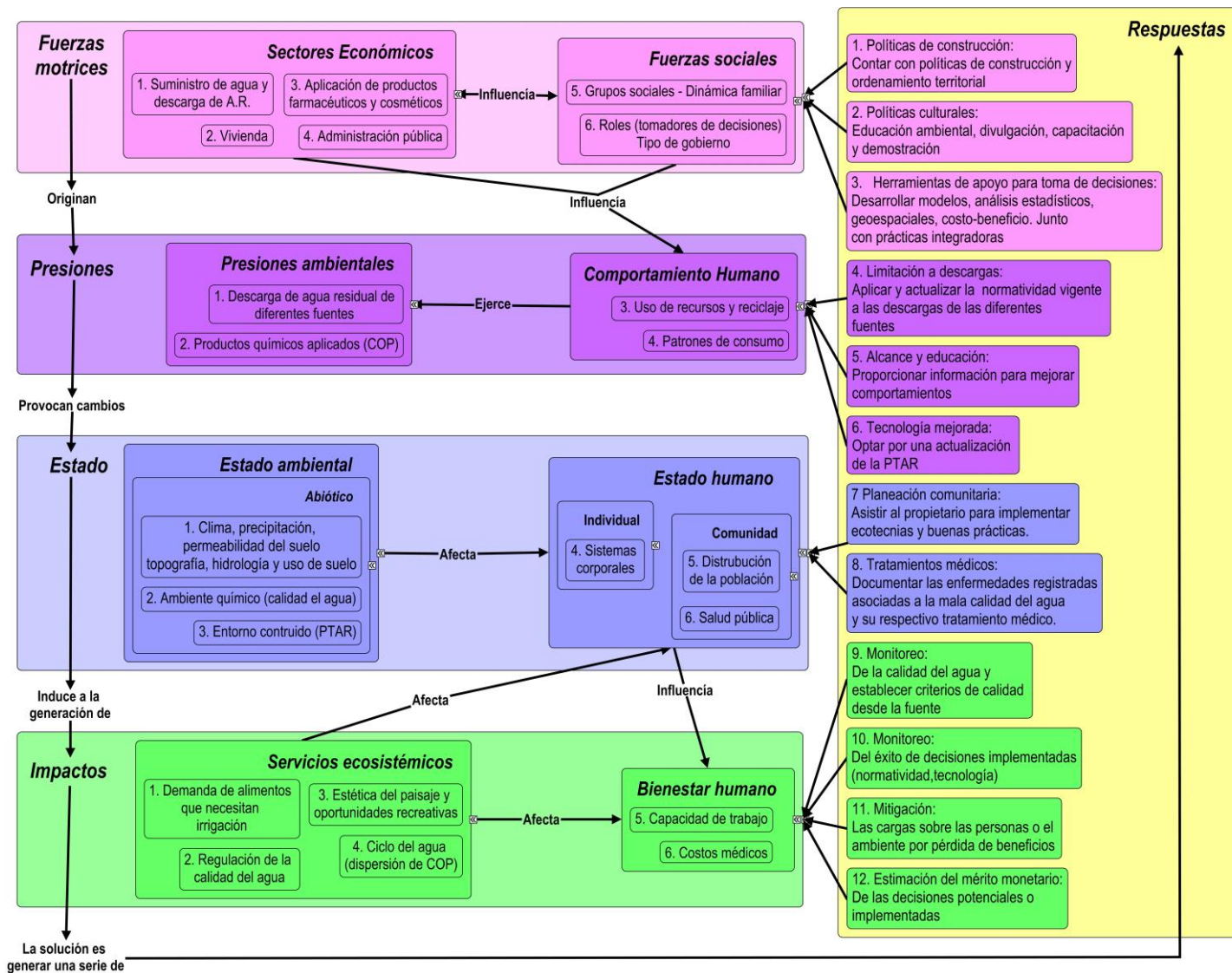


Figura 4. Diagrama de la aplicación del Marco DPSIR a la PTAR de Izúcar de Matamoros. (Elaboración propia, 2021).

En su conjunto, la implementación de las 12 Respuestas contribuiría positivamente a mejorar el desempeño ambiental de la PTAR. Es decir, la aplicación y la actualización de la normatividad, la puesta en marcha de acciones de prevención y monitoreo de la contaminación, el mantenimiento de la infraestructura, el manejo de residuos, la eliminación de los vertimientos clandestinos, la creación de políticas de ordenamiento territorial junto con políticas culturales etc., permitiría que la PTAR alcanzara los niveles de desempeño para los cuales fue diseñada. Para lograr esa implementación es necesario que todos los sectores contribuyan con sus capacidades humanas, institucionales y económicas para llegar a acuerdos viables en el corto, mediano y largo plazo.

Implementado lo anterior, resulta todavía necesaria la actualización tecnológica de la PTAR de manera tal que se logren remover compuestos químicos de difícil degradación, eliminación de microorganismos, disminución de sólidos suspendidos y disueltos, para así disminuir el impacto ambiental de los efluentes de la planta sobre su cuerpo receptor y sobre otros compartimentos ambientales. Elevar la calidad del agua residual tratada hasta su posible potabilización resultaría beneficioso para los habitantes de la cabecera municipal, al tener la posibilidad de reutilizar el agua tratada de manera segura para incorporarla a actividades tales como riego de cultivos, áreas verdes, etc.

La respuesta 6, que se refiere a la actualización tecnológica de la PTAR, se describe a continuación con una mayor profundidad. La propuesta consiste en la aplicación de la ósmosis inversa para la disminución de los sólidos disueltos totales, entre los cuales podrían encontrarse los COP. La propuesta se limita al cálculo técnico utilizando un *software* para la simulación del efecto de la ósmosis inversa en la calidad del efluente de salida de la PTAR.

A continuación, se describe a detalle el diseño del tratamiento con base en el proceso de ósmosis inversa.

VIII. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN TECNOLOGÍA

A continuación, se hace una justificación técnica para la implementación de un tratamiento terciario y con esto una actualización en el diseño de la PTAR de Izúcar de Matamoros como parte de las Respuestas o intervenciones que se proponen realizar para mejorar su desempeño ambiental.

Aunque en un principio la PTAR fue diseñada para cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, el rediseño, que contempla un tratamiento terciario con ósmosis inversa, puede lograr una retención eficaz de los sólidos disueltos y potencialmente lograr la remoción de los COP. Con esta propuesta se desea devolverle al agua la calidad para ser vertida, reutilizada o incluso para ser considerada potable, ya que esto podría significar un beneficio para la comunidad de la cabecera municipal.

8.1. Datos fisicoquímicos del efluente de la PTAR

Se documentaron los datos fisicoquímicos del agua proveniente de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de Izúcar de Matamoros. Los parámetros fisicoquímicos reportados en investigaciones previas son: DQO, DBO, pH, conductividad, sólidos suspendidos, cloro libre, sulfato, níquel, calcio, magnesio, hierro, nitratos y fosfatos.

Cabe mencionar que los datos reportados en la Tabla 16 representan los valores máximos obtenidos en tres muestreos, mismos que se realizaron en junio del 2018, enero y mayo del 2019 y fueron reportados por (García, 2019). Esto con el fin de considerar el escenario más crítico en el diseño del tratamiento terciario, sin importar que en la operación se trabaje con un valor promedio.

Tabla 16. Parámetros fisicoquímicos máximos reportados de junio del 2018 a mayo del 2019.

Parámetro	Efluente PTAR	Límite máximo permisible	Norma que regula el parámetro
DQO	1153.00	210	PROY-NOM-001-SEMARNAT- 2017
DBO	175.00	200	NOM-001-SEMARNAT-1996
pH	8.21	5 a 10	NOM-001-SEMARNAT-1996
		6.5 a 8.5	PROY-NOM-001-SEMARNAT- 2017 NOM-127-SSA1-1994
Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	2290	N.N.	N.N.
Sólidos disueltos totales (mg/L)	1450.00	1000	NOM-127-SSA1-1994
Cloro libre (mg/L)	0.16	0.2 a 1.5	NOM-127-SSA1-1994

Parámetro	Efluente PTAR	Límite máximo permisible	Norma que regula el parámetro
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	150.00	400	NOM-127-SSA1-1994
Níquel Ni ²⁺ (mg/L)	0.29	4	NOM-001-SEMARNAT-1996 PROY-NOM-001-SEMARNAT- 2017
Calcio Ca ²⁺ (mg/L)	200.00	500*	NOM-127-SSA1-1994
Magnesio Mg ²⁺ (mg/L)	65.00		
Hierro Fe ³⁺ (mg/L)	1.00	0.30	NOM-127-SSA1-1994
Nitratos			
NO ₃ -N (mg/L)	100.00	N.N.	N.N.
NO ₃ ¹⁻ (mg/L)	435.00	60	NOM-001-SEMARNAT-1996 En forma de nitrógeno total
		35	PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 En forma de nitrógeno total
		10	NOM-127-SSA1-1994 En forma de Nitratos (como N)
Fosfatos			
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	27.00	30	NOM-001-SEMARNAT-1996 En forma de fósforo total
P (mg/L)	9.00		
P ₂ O ₅ (mg/L)	20.00	21	PROY-NOM-001-SEMARNAT- 2017 En forma de fósforo total

*Dureza total en forma de CaCO₃

N.N. No normado

8.2. Normatividad aplicable

Utilizaremos los parámetros fisicoquímicos máximos reportados en la Tabla 16 para evaluar el cumplimiento de los parámetros reportados en la Tabla 17, 18 y 19. Considerando que la descarga del agua residual tratada, de la PTAR de Izúcar de Matamoros, se tiene permitida hacia el Río Nexapa y sus parámetros reflejan la medición de su Promedio Diario (P.D.) los cuales se describen a continuación:

Tabla 17. Comparación de los parámetros obtenidos con los límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-1996

Parámetros (*) (mg/L) Excepto cuando se especifique	Descarga en Ríos	Efluente de la PTAR de Izúcar de Matamoros descargado en el Río Nexapa	Cumple	
	P.D.		Sí	No
DBO	200	175	x	
Nitrógeno total	60	535*		x
Fósforo total	30	56**		x
pH (UpH)	5 - 10	8.21	x	
Níquel	4	0.29	x	

* Suma de las concentraciones de unidades de nitrato-nitrógeno y nitratos.

**Suma de las concentraciones de fosfatos, fósforo y óxido fosfórico.

Tabla 18. Comparación de los parámetros con los límites máximos permisibles PROY-NOM-001-SEMARNAT-1996

Parámetros (*) (mg/L) Excepto cuando se especifique	Descarga en Ríos	Efluente de la PTAR de Izúcar de Matamoros descargado en el Río Nexapa	Cumple	
	V.I.		Sí	No
DQO	210	1153		x
Nitrógeno total	35	535*		x
Fósforo total	21	56**		x
pH (UpH)	6.5 – 8.5	8.21	x	
Níquel	4	0.29	x	

* Suma de las concentraciones de unidades de nitrato-nitrógeno y nitratos.

**Suma de las concentraciones de fosfatos, fósforo y óxido fosfórico.

Tabla 19. Comparación de los parámetros obtenidos con los límites máximos permisibles NOM-127-SSA1-1994

Parámetros (*) (mg/L) Excepto cuando se especifique	Límites permisibles de características químicas	Efluente de la PTAR de Izúcar de Matamoros descargado en el Río Nexapa	Cumple	
			Sí	No
Cloro residual libre	0.2 a 1.50	0.16	x	
Dureza total como (CaCO₃)	500	767.04	x	
Sólidos disueltos totales	1000	1450		x
Hierro	0.30	1		x
Nitratos (como N)	10	435		x
pH (UpH)	6.5 – 8.5	8.21	x	

Con los datos anteriores se determinó que hay un cumplimiento de forma parcial con algunas de las características que la norma limita, por ejemplo: los valores de hierro y nitratos están fuera de los permitidos, esto puede deberse a que en los periodos en los que no hay funcionamiento de la PTAR se presenta estancamiento del agua residual y por lo tanto la presencia de nutrientes provoca

el aumento de estos valores y esto sin lugar a dudas no implica el cumplimiento normativo dentro de los límites permitidos.

Se debe considerar que los muestreos, análisis e informes se deben de realizar de forma mensual de acuerdo con lo indicado en la norma en materia de agua residual, y también se deben de presentar de forma trimestral los informes de resultados de muestreos de la PTAR. Aunado a esto, se debe de llevar una bitácora diaria con los parámetros más representativos, ya que estos permiten tomar de decisiones operacionales más precisas respondiendo a la variabilidad de la cantidad y calidad del agua residual que está recibiendo el tratamiento. Por lo que esta propuesta puede ser considerada realmente como un anteproyecto de Respuesta o de Intervención, dada la falta de datos tanto cuantitativos como cualitativos del sistema de estudio.

En el análisis de la información de los datos fisicoquímicos se desprende que actualmente la PTAR no cumple con todos los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, por lo que es necesario llevar a cabo una actualización tecnológica de la PTAR. Para ello, se propone la tecnología de Ósmosis Inversa que se describe a continuación.

8.3. La ósmosis inversa y su aplicación en aguas residuales

La osmosis inversa es un proceso de filtración basado en el fenómeno natural que se produce en las células de los seres vivos llamado ósmosis, donde dos soluciones de distinta concentración salina tienden a igualar sus concentraciones a través de una membrana.

En el proceso de ósmosis inversa se aplica una presión mayor a la presión osmótica en el fluido que contiene la más alta concentración de sólidos disueltos, haciendo que el agua pase por una membrana semipermeable en dirección contraria al proceso natural de ósmosis. Este proceso permite concentrar o eliminar contaminación de una solución líquida, ya sean sólidos disueltos o suspendidos, e incluso bacterias y virus (Comisión Nacional del Agua, 2019a). Esta técnica, aplicada en aguas residuales permite eliminar materia orgánica, nitrógeno, fósforo, sólidos disueltos, bacterias, protozoos y helmintos, virus y constituyentes traza como compuestos químicos emergentes y persistentes que actualmente son una preocupación ambiental sustancial (Comisión Nacional del Agua, 2019a).

Las principales aplicaciones de la osmosis inversa a nivel industrial, es la desalinización de agua de mar, remoción o reducción de subproductos de desinfección, la obtención de agua pura y ultrapura, el tratamiento de aguas residuales y su recuperación para reúso y la potabilización del agua (Moreno, 2011).

Algunos de los componentes de los sistemas de ósmosis inversa son; las membranas, los tubos de alta presión que contienen el arreglo de membranas o *housings*, una bomba generadora de presión, además de válvulas reguladoras de control y colectores de permeado y concentrado. Las membranas son un componente crítico del sistema de ósmosis inversa, éstas están hechas de material hidrofílico, permeable al agua e impermeable a los solutos, capaz de soportar altas presiones. Las membranas comerciales más usadas están fabricadas con acetato de celulosa y de película fina, y cada una tiene diferentes condiciones de operación y desempeño. En general se debe controlar el ensuciamiento de las membranas para garantizar su óptimo funcionamiento y prolongar su vida útil, generalmente para evitar este ensuciamiento se hacen pretratamientos al agua de alimentación, retro lavados en las membranas y también se aplican productos químicos para hacer lavados. (Comisión Nacional del Agua, 2019a)

Las membranas deben colocarse en estructuras resistentes o *housings*, que las mantengan fijas a pesar de las altas presiones que estas experimentan, estos tubos a su vez se sujetan a una estructura que los soporte y permita la instalación de las conexiones necesarias para operar; bombas, válvulas de control, así como colectores de permeado y concentrado.

Los arreglos en el sistema de ósmosis inversa son variados, ya que, dependiendo de la producción deseada, las membranas suelen colocarse en distintos módulos en paralelo, e incluso se llega a recircular parte del concentrado al sistema de filtración.

A continuación, se describen algunas ventajas y desventajas del empleo de membranas en el tratamiento de agua (Palacios et al., 2017).

Ventajas:

- Permiten separar contaminantes sólidos orgánicos o inorgánicos disueltos en el agua
- Eliminan contaminantes que se encuentran en baja concentración
- Remueve microorganismos
- Operan a temperatura ambiente

- Consisten en arreglos modulares compactos que no ocupan mucho espacio
- Pueden combinarse con otros tratamientos

Desventajas:

- No eliminan el contaminante, solo lo concentran en otra fase
- Pueden existir incompatibilidades entre el contaminante y la membrana
- La membrana puede ser dañada por el ensuciamiento y esto puede causar la disminución de sus propiedades hidráulicas.
- Se necesita un pretratamiento para mantener el funcionamiento a largo plazo de las membranas.
- Los sistemas de tratamiento no son escalables: doble flujo, no significa doble de equipos (equipos modulares).

No obstante, en México se han realizado inversiones para implementar tratamientos que contemplan la ósmosis inversa para el reúso de agua tratada que requiere altos niveles de calidad, por ejemplo: para la recarga de acuíferos o de cuerpos de agua superficiales que se utilizan como suministro de agua para riego o agua potable. A continuación, en la Tabla 20, se exponen algunos casos en los que se ha implementado este tipo de tratamientos terciarios, en nuestro país.

Tabla 20. Proyectos de aplicación de ósmosis inversa para diferentes propósitos realizados en México.

Tipo de proyecto	Producción	Año	Inversión	Documento referencia	Inversionista
Construcción de planta potabilizadora por ósmosis inversa para mejoramiento de la calidad del agua en la Cabecera municipal de San Pedro del Gallo, del Estado de Durango	4 gal/min	2013	\$370,623.32	Fallo licitación IO-016B00018-N21-2013	CONAGUA ¹
Construcción de planta potabilizadora con una capacidad de 5 GPM etapa 1/1 trabajos a ejecutarse en la Localidad Villa Hidalgo, del municipio de Hidalgo.	5 gal/min	2018	\$725,754.72	Fallo licitación IO-910018998-E49-2018	Comisión del Agua del Estado de Durango ²

Tipo de proyecto	Producción	Año	Inversión	Documento referencia	Inversionista
Perforación de un pozo de aprovechamiento de agua salobre y un pozo para descargar el agua de rechazo del sistema, así como la instalación de una planta de osmosis inversa	220 m ³ /día Equivalente a 40.36 gal/min	2018	\$3,000,000.00	Manifiesto de impacto ambiental	Los Vientos de Vaivén Maestro, A.C. ³
Instalación y operación de una planta desalinizadora por ósmosis inversa marca, <i>Biosaving Energy</i>, modelo BSE-SW-400-5R-6M, con tecnología de filtración por membranas de osmosis inversa, con recuperador de energía, automatizada y con medición de caudales de alimentación, rechazo y permeado (agua desalada producida)	800 m ³ /día Equivalente a 146.76 gal/min	2019	520,000.00 USD Equivalente a \$10,060,908.00	Manifiesto de impacto ambiental	Turística Cancún, S. de R. L. de C.V. ⁴
Diseño, construcción, equipamiento, operación y mantenimiento de una planta desalinizadora en Playas de Rosarito, en el Estado de Baja California.	4.4 m ³ /s Equivalente a 69,741.45 gal/min	2016	\$9,072,882,279.00	Contrato	Comisión Estatal del Agua de Baja California ⁵

Elaboración propia con datos de:

1 (Construcción de Planta Potabilizadora Por Ósmosis Inversa Para Mejoramiento de La Calidad Del Agua En La Cabecera Municipal de San Pedro Del Gallo, Del Estado de Durango, 2013)

2 (Construcción de Planta Potabilizadora Con Una Capacidad de 5 GPM Etapa 1/1 Trabajos a Ejecutarse En La Localidad Villa Hidalgo, Del Municipio de Hidalgo., 2018)

3 (Los Vientos de Vaivén Maestro A.C, 2018)

4 (Turística Cancún S.de R.L. de C.V., 2019)

5 (Diseño, Construcción, Equipamiento, Operación y Mantenimiento de Una Planta Desalinizadora En Playas de Rosarito, En El Estado de Baja California., 2016)

8.4. Simulación del proceso

Con algunos de los parámetros fisicoquímicos máximos reportados en a Tabla 16, se realizó la simulación del proceso de ósmosis inversa, que contempla el uso de la tecnología de membranas, para evaluar el efecto sobre la eliminación de contaminantes inorgánicos para que al agua reúna las características para ser vertida en un cuerpo de agua o reutilizada una vez que se asegure que su calidad es apta, ya que cumple con los límites máximos permisibles de la normatividad vigente aplicable.

Para realizar la simulación se utilizó el *Software* Winflows, versión 4.0 de la empresa francesa denominada Suez, este simulador permite diseñar sistemas de ósmosis inversa de una manera intuitiva y al mismo tiempo ofrece una gama de productos químicos de pretratamiento junto con sus tasas de dosificación para lograr extender la vida útil de las membranas seleccionadas.

a) Datos de la alimentación

Tabla 21. Datos introducidos al simulador Winflows

Parámetro	Valor especificado por el usuario
Temperatura (°C)	25
pH (UpH)	8.21
Sólidos disueltos totales (TDS) (mg/L)	1450
Iones (mg/L)	
Calcio (Ca)	200
Magnesio (Mg)	65
Sodio (Na)	N.D.
Potasio (K)	N.D.
Amonio -N(NH ₄)	N.D.
Bario (Ba)	N.D.
Estroncio (Sr)	N.D.
Hierro (Fe)	1
Magnesio (Mn)	N.D.
Cationes (mg/L)	
Sulfatos (SO ₄)	150
Cloro (Cl)	0.16
Flúor (F)	N.D.
Nitratos (NO ₃)	435
Bromo (Br)	N.D.
Fosfatos (PO ₄)	27
Boro (B)	N.D.
Sílice (SiO ₂)	N.D.
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	N.D.
Bicarbonato (HCO ₃)	N.D.
Dióxido de carbono (CO ₂)	N.D.
Carbonato (CO ₃)	N.D.

N.D. No disponible al momento de iniciar la simulación.

Al alimentar los datos de la Tabla 21, el *software* hace un balance automático de las concentraciones de iones, cationes y hace el cálculo de algunos otros parámetros como *Silt Density Index* (SDI) usado para medir la tasa de ensuciamiento en las membranas de ósmosis inversa, *Langlier Saturation Index* (LSI) que reporta el índice del potencial corrosivo del agua alimentada a las membranas de ósmosis inversa, Índice Stiff-Davis (S&DI) que indica la tendencia incrustante del agua por Carbonato de Calcio y otros como, presión osmótica, conductividad, densidad, concentración de CaSO₄ y sólidos disueltos totales (TDS).

A continuación, se deben introducir los datos para especificar el flujo de alimentación al sistema de membranas, que para este caso es de 1355.35 gal/min que equivalen a 85.5 L/s y el porcentaje de recuperación, que se simuló del 81% y adicionalmente se recirculó el 15% del concentrado hacia las membranas.

El *software* nos permite hacer una dosificación previa a la alimentación que permite controlar algunos parámetros para proteger la vida útil de las membranas, evitando incrustaciones o saturación. Para este sistema de membranas se consideró un suavizador con 6504.86 mg/L de NaCl para disminuir la dureza total y una dosificación después de la alimentación que en este caso se realizó con 126.26 mg/L de HCl con el objetivo de llevar el pH a un valor neutro. Posteriormente se consideró aplicar filtros de cartucho para la remoción de sólidos suspendidos totales formados por el ajuste de pH o incluso partículas como resina de los suavizadores.

Enseguida el *software* calcula las especificaciones requeridas para que una bomba de alta presión, alimente el flujo de 1403.10 gal/min al sistema de membranas, para este sistema, en particular se calculó que es necesaria una potencia aproximada de 77.84 kW, para obtener una presión de descarga de 94.62 psi.

b) Selección del arreglo del sistema de membranas

En el paso siguiente se determinó que el arreglo del sistema de membranas constaría de dos módulos:

- El primer módulo considera 6 elementos por cada *housing* y un total de 60 *housings*, por lo que, para este primer módulo el número total de membranas es de 360.
- El segundo módulo, igual que el anterior considera 6 elementos por cada *housing* y un total de 30 *housings*, por lo que se requieren 180 membranas.

La selección de la membrana se llevó a cabo considerando una membrana estándar en la industria correspondiente a la Serie A de película fina (*thin film*). Estas se caracterizan por permitir un flujo alto y un rechazo de NaCl. Las Tablas 22 y 23 describen algunos datos, especificaciones y parámetros de operación de la membrana empleada en la simulación:

Tabla 22. Datos de la membrana seleccionada

Membrana Serie A de Película fina							
Modelo	Flujo promedio de permeado		Área de la membrana		Rechazo promedio de NaCl	Rechazo mínimo de NaCl	Tipo de cartucho
	GPD	m ³ /día	ft ³	m ³			
AG8040F 400	11,000	41.6	400	37.2	99.5%	99.0%	Fibra de vidrio

Tabla 23. Parámetros de operación de la membrana seleccionada

Parámetros de operación	
Presión de operación	200 psi (1,379 kPa)
Flujo de operación	10 – 20 Gal/día*ft ²
Presión máxima de operación	Tapa: 450 psi (3,103 kPa) Envoltura exterior: 600 psi (4,137 kPa)
Temperatura máxima	Operación continua: 122°F (50°C) Limpieza en el sitio (CIP): 122°F (50°C)
Rango de pH	Rechazo optimo: 7.0-7.5, Operación continua: 2.0-11.0, Limpieza en el sitio (CIP): 1.0-13.01
Caída de presión máxima	Sobre un elemento: 12 psi (83 kPa) Por cada <i>housing</i> : 50 psi (345 kPa)
Tolerancia al cloro	1,000 + ppm-hora Se recomienda dechloración
Agua de alimentación	Turbidez NTU < 1 Índice de densidad de sedimentos SDI < 5

c) Recuperación del sistema de membranas

Para el arreglo se resume a continuación en la Tabla 24.

Tabla 24. Arreglo del sistema de membranas

Módulo	Total		Tipo de elementos	Flujo gal/min		Presión Psi		Sólidos disueltos totales TDS (mg/L) en el producto o permeado
	<i>Housings</i>	Elementos		Alimentación	Permeado	Alimentación	Caída de presión	
1	60	360	AG8040F 400	1400.10	794.67	94.62	4.25	123.49
2	30	180	AG8040F 400	608.43	290.15	90.38	3.61	319.20
Total	90	540			1084.82			

d) Resultados de la simulación

Con la simulación realizada se puede observar en el Figura 5, que el volumen de alimentación neta es de 1355.35 gal/min y que la recuperación del arreglo que contempla la recirculación del 15% del concentrado nos permite obtener una recuperación del 80% por lo que se genera un producto o permeado de 1084.82 gal/min y un concentrado de 270.55 gal/min.

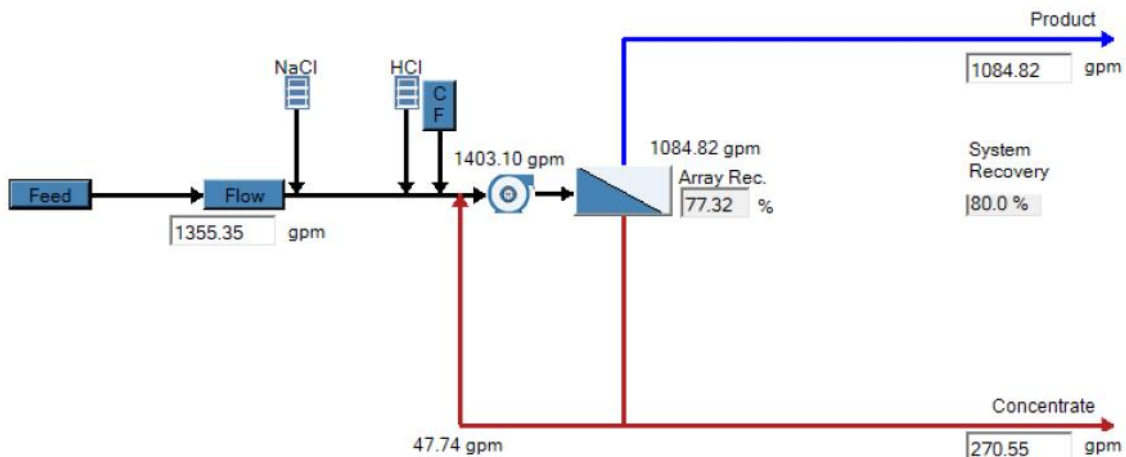


Figura 5. Arreglo del sistema de membranas

La Tabla 25 nos proporciona un resumen de los datos arrojados de la simulación en función del flujo de alimentación, el producto o permeado y el concentrado, asimismo nos permite comparar la diferencia de los sólidos disueltos totales en la alimentación, en el producto o permeado y en el concentrado. Resultando que los sólidos disueltos totales tuvieron una reducción del 87.87% en su concentración.

Tabla 25. Datos resultantes del arreglo del sistema de membranas

Flujo	gal/min	Datos analíticos	mg/L
Alimentación neta	1355.35	Alimentación neta TDS	1450.00
Producto	1084.82	Producto TDS	175.82
Concentrado	270.55	Concentrado TDS	7300.71

En la Tabla 26 se muestran los resultados de la disminución de la concentración de algunos parámetros alcanzados mediante la simulación que se realizó a partir de los datos de alimentación capturados previamente.

Tabla 26. Resultados de la remoción de iones, otros parámetros y datos de saturación

Iones	Unidad	Alimentación	Producto	Concentrado
Calcio	mg/L	200.00	0.09	19.21
Magnesio	mg/L	65.00	0.03	6.24
Sodio	mg/L	166.27	51.04	2363.38
Hierro	mg/L	1.00	0.00	0.00
Sulfatos	mg/L	150.00	3.36	737.97
Cloro	mg/L	346.60	17.04	1751.26
Nitratos	mg/L	435.00	98.25	1785.23
Fosfatos	mg/L	27.00	0.79	132.08
Bicarbonatos	mg/L	126.75	5.21	504.07
Dióxido de carbono	mg/L	1.03	16.79	21.92
Carbonatos	mg/L	1.55	0.00	1.27
Otros parámetros	Unidad	Alimentación	Producto	Concentrado
TDS	mg/L	1450.00	175.82	7300.71
Flujo	gal/min	1355.35	1084.82	270.55
Temperatura	°C	25.00	25.00	25.00
Presión	psi	0.00	0.00	86.77
Presión osmótica	psi	11.64	1.70	65.50
pH	UpH	8.21	5.68	7.40
Conductividad a 25°C	µS/cm	2387.00	265.00	10229.00
Datos de saturación	Unidad	Alimentación	Producto	Concentrado
CaSO₄	%	6.23	0.00	1.13
LSI		0.98	-5.98	-0.41
S&DI		0.79	-6.41	-0.58

Como resultado de la simulación se puede observar una importante reducción en el producto o permeado, especialmente en parámetros como calcio, magnesio, sodio, hierro, sulfatos, cloro, nitratos, fosfatos, bicarbonatos, carbonatos, sólidos disueltos totales, pH y conductividad. Así como en CaSO₄, LSI y S&DI.

En la Tabla 27 se evalúa el cumplimiento de los parámetros obtenidos de la simulación de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994, que considera una mayor cantidad de parámetros de calidad de agua, a diferencia de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017.

Tabla 27. Resultados del producto y cumplimiento de la normatividad aplicable

Parámetro	Unidad	Producto	NOM-127-SSA1-1994	
			Cumple	
			Sí	No
Calcio	mg/L	0.09		N.N.
Magnesio	mg/L	0.03		N.N.
Sodio	mg/L	51.04	x	
Potasio	mg/L	0.00		N.N.
Amoniaco -N (NH4)	mg/L	0.00		N.N.
Bario	mg/L	0.00	x	
Estroncio	mg/L	0.00		N.N.
Hierro	mg/L	0.00	x	
Manganeso	mg/L	0.00	x	
Sulfatos	mg/L	3.36	x	
Cloro (Cloruros Cl ⁻)	mg/L	17.04	x	
Flúor (Fluoruros F ⁻)	mg/L	0.00	x	
Nitratos (como N)	mg/L	98.25		x
Bromo	mg/L	0.00		N.N.
Fosfatos	mg/L	0.79		N.N.
Boro	mg/L	0.00		N.N.
Sílice	mg/L	0.00		N.N.
Sulfuro de hidrógeno	mg/L	0.00		N.N.
Bicarbonatos	mg/L	5.21		N.N.
Dióxido de carbono	mg/L	16.79		N.N.
Carbonatos	mg/L	0.00		N.N.
TDS	mg/L	175.82	x	
Temperatura	°C	25.00		N.N.
pH	UpH	5.68		x
Conductividad a 25°C	µS/cm	265.00		N.N.

N.N. No normado

Con la simulación se logró una disminución en más del 99% de la concentración de parámetros como: calcio, magnesio, hierro. Mientras que los sulfatos se redujeron un 97.7%, los nitratos 77.41%, los fosfatos 97.07% y los sólidos disueltos totales en un 87.87%.

Como se observa en la Tabla 27 la concentración de los nitratos y el pH no se encuentran dentro de los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994, si bien el ion nitrato al presentar afinidad por el ion sodio, podría producirse nitrato de sodio, este compuesto no representaría riesgo alguno en aplicaciones de riego agrícola, sin embargo, si es importante la reducción de nitrato para que cumpla con la norma, pues al estar fuera de rango este parámetro, las autoridades competentes podrían realizar una sanción.

8.5. Optimización de la simulación

Al identificar en la Tabla 27 que a pesar del tratamiento de ósmosis inversa aún no se cumple con los parámetros aceptables por la norma NOM-127-SSA1-1994 en el parámetro de nitratos, se propone llevar a cabo un tratamiento previo. Para este propósito, se requiere llevar a cabo un proceso que involucre la reacción de oxidación (nitrificación) y de reducción (desnitrificación) que tenga una eficiencia de al menos el 90%, mientras que, para cumplir con el rango de pH aceptado por la norma se debe considerar hacer una dosificación de sosa cáustica para neutralizar el agua producto del tratamiento de ósmosis inversa antes de ser vertida o reutilizada.

Una vez realizado el pretratamiento propuesto, obtenemos que este parámetro disminuye aún más, hasta 9.68 mg/L, y con ello se daría cumplimiento a la norma como se puede observar en la Tabla 28, toda vez que cumple con el límite máximo permisible.

Tabla 28. Comportamiento del ion nitrato antes y después de realizar el pretratamiento propuesto.

Iones	Unidad	Alimentación	Producto	NOM-127-SSA1-1994	
				Cumple	
Sin pretratamiento					
Nitratos (como N)	mg/L	435	98.25		x
Con pretratamiento					
Nitratos (como N)	mg/L	43.5	9.68	x	

Adicionalmente, en los datos obtenidos de la simulación de optimización reportados en las Tablas 29 y 30 observamos que, debido a la disminución en la concentración del parámetro de nitrato, se requiere utilizar un menor número de elementos (18 menos) y en consecuencia un número menor de *housings* (3 menos) para obtener un porcentaje de recuperación del 81%.

Tabla 29. Arreglo optimizado del sistema de membranas

Módulo	Total		Tipo de elementos	Flujo gal/min		Presión Psi		Sólidos disueltos totales TDS (mg/L) en el permeado
	Housings	Elementos		Alimentación	Permeado	Alimentación	Caída de presión	
1	58	348	AG8040F 400	1400.70	819.27	101.20	4.37	48.14
2	30	180	AG8040F 400	581.43	279.17	96.88	3.49	135.22
Total	87	522			1098.45			

Tabla 30. Datos resultantes del arreglo optimizado del sistema de membranas

Flujo	gal/min	Datos analíticos	mg/L
Alimentación neta	1355.35	Alimentación neta TDS	1351.53
Producto	1098.45	Producto TDS	72.28
Concentrado	256.92	Concentrado TDS	7236.50

A continuación, en la Figura 6 se muestra el arreglo optimizado del sistema de membranas, con el que se logra una remoción total del 95.01% de la concentración de sólidos disueltos totales en el producto o permeado.

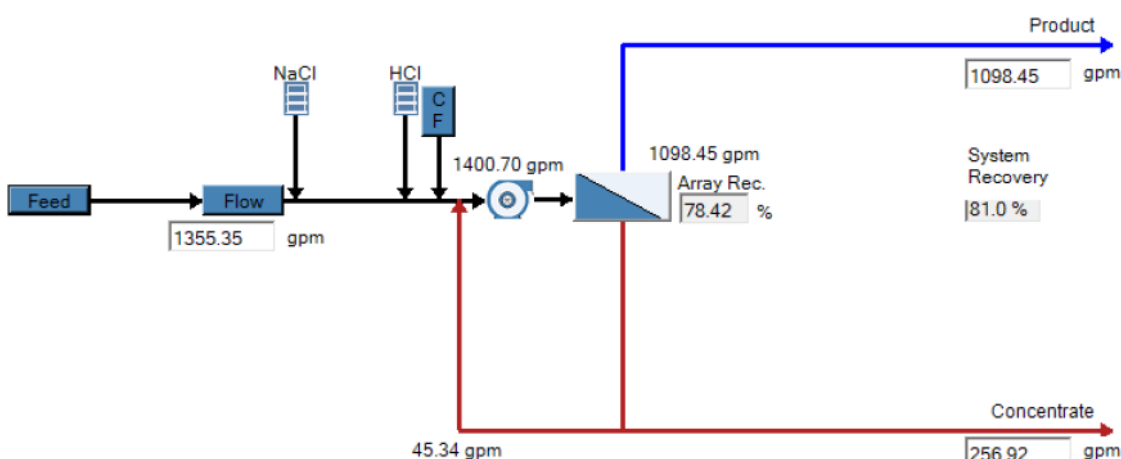


Figura 6. Arreglo optimizado del sistema de membranas

Por lo que, se puede determinar que a partir de esta optimización los resultados de los parámetros considerados cumplirían con algunos de los límites máximos permisibles aplicables conforme a la norma NOM-127-SSA1-1994.

8.6. Tratamiento terciario propuesto

El tratamiento terciario propuesto incluye además del sistema de ósmosis inversa una serie de procesos previos a la alimentación de flujo a las membranas, esto para proteger a las mismas de probables incrustaciones que pueden causar su saturación y también para evitar el daño causado por la presencia de agentes oxidantes o un gran contenido de sólidos y con esto aumentar su vida útil, estos procesos son; nitrificación – desnitrificación, clarificación, dosificación de cloro, suavización – filtración con carbón activado – filtración de múltiple capa, ósmosis inversa y desinfección.

En la Figura 6, se puede observar el diagrama de flujo propuesto para la actualización de la PTAR de Izúcar de Matamoros.

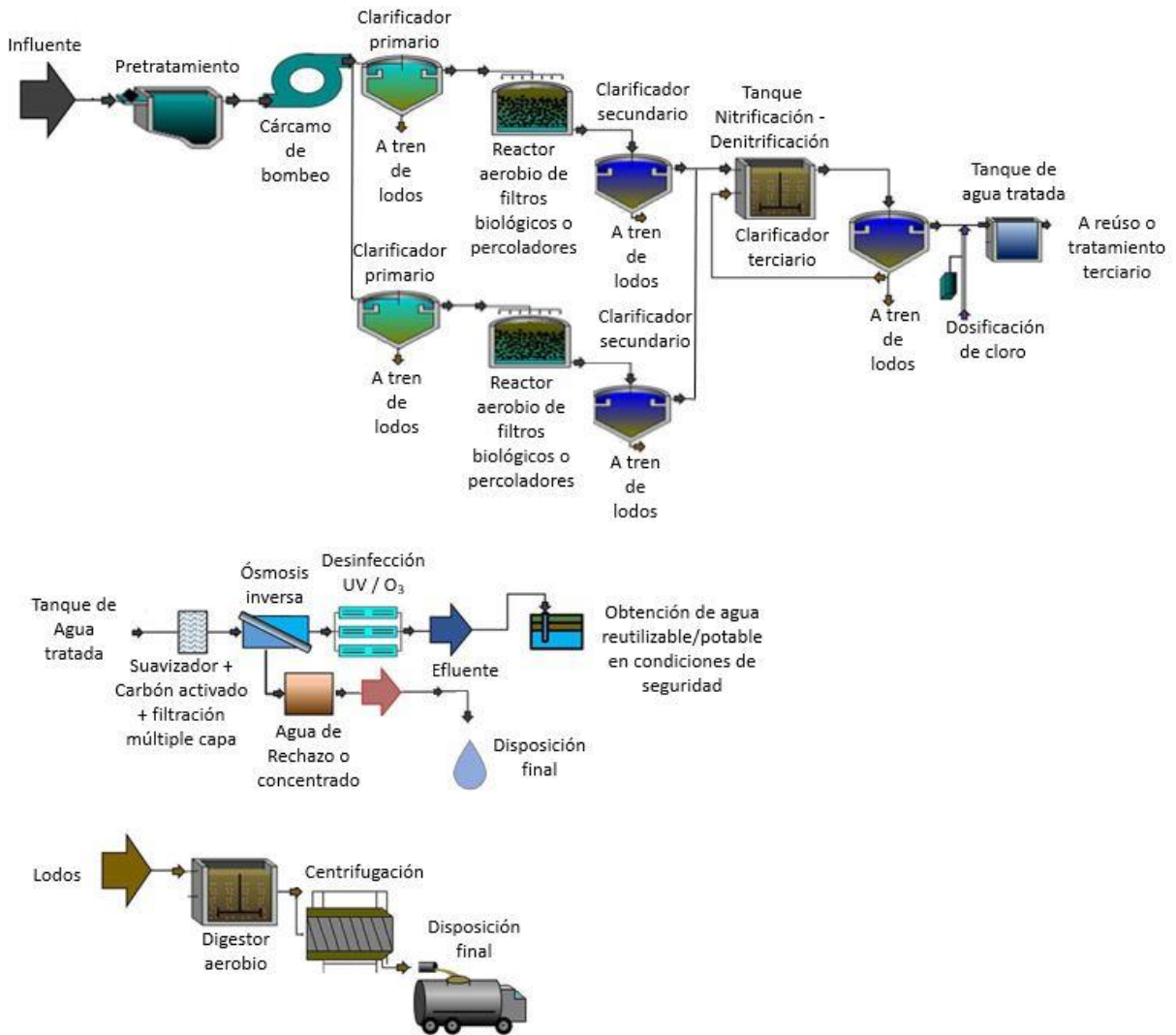


Figura 7. Diagrama de flujo de la propuesta de actualización de la PTAR de Izúcar de Matamoros

Adaptado de (CONAGUA, 2019).

IX. PERSPECTIVA

La tecnología de ósmosis inversa es una propuesta preliminar que requiere aun de un extenso trabajo para poder llevarla a su implementación en la PTAR. Primero, la propuesta de actualización implica que las instalaciones actuales de la PTAR deben funcionar de manera correcta, y con los mantenimientos de equipo y capacitación de personal permanentemente. En segundo lugar, los datos simulados de ósmosis inversa deben ser corroborados por experimentos a nivel piloto; lo anterior permitiría poder avanzar hacia el cálculo de la factibilidad técnica, económica e incluso energética de la tecnología; la evaluación de la factibilidad debe incluir también el análisis de las capacidades institucionales y de recursos humanos con los que cuentan los involucrados en su instalación, operación y mantenimiento.

Adicionalmente, el concentrado de la ósmosis deberá ser caracterizado y tener una disposición final adecuada. Para ello, algunas alternativas como su disposición en pozos de perforación, una tecnología establecida por años, podría ser considerada. Un mecanismo que se ha aplicado para reducir los efectos ambientales adversos de los concentrados de ósmosis inversa se basa en su dilución con aguas de refrigeración de las centrales eléctricas (Einav & Lockiec, 2003). Las salmueras también pueden diluirse con agua de mar natural o con aguas residuales municipales para reducir la salinidad antes del vertido (Meneses et al., 2010; Roberts et al., 2010) , aunque los efectos de la eliminación de concentrados diluidos también pueden afectar a las especies sensibles, por lo que la solución debe ser adecuada a las condiciones locales.

Respecto a la remoción de COP presentes en la PTAR, numerosos estudios han demostrado que los sistemas de membranas remueven eficazmente una amplia gama de COP con rechazos generalmente superiores al 90% (Appleman et al., 2014; Busch et al., 2010; Flores et al., 2013; Lipp et al., 2010; Quiñones, O. & Snyder, 2009; Steinle-Darling, E. & Reinhard, 2008; Steinle-Darling et al., 2010; Tang et al., 2006, 2007; Thompson et al., 2011; Yan et al., 2015; Zeng et al., 2017). Estos antecedentes indican que potencialmente, el sistema de membranas podría remover algunos de los 300 contaminantes emergentes y/o persistentes detectados en los efluentes de la PTAR, lo que abatiría la DQO y la toxicidad de este; esto, por supuesto, debe comprobarse experimentalmente. En el caso de que los concentrados contuvieran COP o emergentes, sería necesario aplicar tecnologías de tratamiento al concentrado antes de su disposición final. Para ello, sería necesario evaluar tanto las tecnologías establecidas a nivel industrial como las emergentes que han sido reportadas en las revistas científicas. Ejemplos son la electrodiálisis, fotoquímica y fotocatalisis, oxidación electroquímica, sonólisis, proceso Fenton; y las combinaciones entre ellos (Tow et al., 2021).

Finalmente, para poder implementar tecnologías de tratamiento de agua residual se deben involucrar todas las partes interesadas o beneficiarios, para que exista así una garantía en la toma de decisiones y en la transparencia de los procesos que se involucran en su funcionamiento, contemplando su diseño, instalación,

operación y mantenimiento. Es importante que los usuarios o beneficiarios conozcan y logren identificar conceptos como “uso eficiente de agua” y “tratamiento de aguas residuales” y su relación con el cuidado del medio ambiente y la salud. De esta manera, las intervenciones llevadas a cabo para actualizar la PTAR serán socialmente aceptadas, ya que los usuarios accederán a hacer un pago justo, equitativo y solidario de las tarifas aplicadas para darle tratamiento a las aguas residuales, pudiendo incluso obtener subsidios al demostrar que las acciones ayudan a mejorar el medio ambiente, la salud de la población y a fortalecer el reúso del recurso hídrico.

X. CONCLUSIONES

A través del marco de referencia DPSIR aplicado a la PTAR de Izúcar de Matamoros se encontró que los factores involucrados en el desempeño de la PTAR fueron: los socioeconómicos como el crecimiento poblacional y la poca acción participativa; los factores institucionales como la falta en la actualización de la normatividad y la carencia de políticas públicas relacionadas al tratamiento de agua; los factores ecológicos como el incumplimiento de la normatividad ambiental en parámetros como DQO y sólidos disueltos totales; mientras que factores tecnológicos detectados como la falta de mantenimiento, capacitación y actualización de la PTAR. Las acciones propuestas son una primera aproximación para abordar cada uno de los factores identificados que afectan el funcionamiento de la PTAR. La falta de información es un reto importante que debe ser superado antes de implementar de manera exitosa cualquier intervención.

La propuesta de intervención tecnológica basada en la ósmosis inversa tiene el propósito de disminuir la cantidad de sólidos disueltos, microorganismos y potencialmente de remover los COP hallados, con la finalidad de evitar el vertimiento hacia el río Nexapa y en consecuencia hacia otros compartimentos ambientales. Sin embargo, los valores presentados corresponden a una revisión y análisis cualitativo preliminar, con la intención de conocer la viabilidad de trabajar con el proceso de ósmosis inversa desde el punto de vista de un anteproyecto. Sin lugar a duda, es importante poder complementar este trabajo obteniendo un mayor número de iones determinados de forma experimental, luego de realizar muestreos que nos permitan conocer el valor que resulta del análisis de una muestra compuesta para obtener el promedio diario de cada parámetro y así mismo su comportamiento en las diferentes estaciones del año. La factibilidad técnica y económica necesita ser determinada a detalle para conocer la potencialidad de su aplicación.

XI. LITERATURA CITADA

- Agenda 2030. (2017). *Agua limpia y saneamiento*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agenda2030/articulos/6-agua-limpia-y-saneamiento>
- Agyemang, I., McDonald, A., & Carver, S. (2007). Application of the DPSIR framework to environmental degradation assessment in northern Ghana. *Natural Resources Forum*, 31(3), 212–225. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2007.00152.x>
- Alvarado, A. R., Díaz, E., & Pérez, C. A. (2017). El saneamiento del agua a través de la planeación hídrica 1975 - 2018. In Plaza Y Valdés México (Ed.), *El Desarrollo Sustentable. Desafíos y oportunidades* (Primera ed).
- Appleman, T. D., Higgins, C. P., Quiñones, O., Vanderford, B. J., Kolstad, C., & Zeigler-Holady, J. C. & Dickenson, E. R. V. (2014). Treatment of poly- and perfluoroalkyl substances in U.S. fullscale water treatment systems. *Water Research*, 51, 246–255. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.067>
- Arroyo, M., Levine, A., Brenner, L., Seingier, G., Leyva, C., & Espejel, I. (2020). Indicators to measure pressure, state, impact and responses of surf breaks: The case of Bahía de Todos Santos World Surfing Reserve. *Ocean and Coastal Management*, 194, 105252. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105252>
- Busch, J., Ahrens, L., Sturm, R., & Ebinghaus, R. (2010). Polyfluoroalkyl compounds in landfill leachates. *Environmental Pollution*, 158, 1467. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.12.031>
- Campos, E., Palatsi, J., Illa, J., Solé, F., Magarí, A., & Flotats, X. (2004). *Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas*. 70. http://www.arc-cat.net/es/altres/purins/guia/pdf/guia_dejeccions.pdf
- Cap-Net UNDP. (2016). *Water Pollution Management : An IWRM Approach to Improving Water Quality [Training Manual]*. 176.
- Cesar, J., Cesareo, F., González, A. B., López, S. V., Cajuste, L., Escobedo, F. J., & Ramírez, V. (2020). Cartografía del uso del suelo en la subcuenca Huaquechula, Puebla, México, con un índice combinado de imágenes de satélite. *Investigaciones Geográficas, Instituto de Geografía, UNAM.*, 101, 14. <https://doi.org/dx.doi.org/10.14350/ig.59914>
- Construcción de planta potabilizadora con una capacidad de 5 GPM etapa 1/1 trabajos a ejecutarse en la Localidad Villa Hidalgo, del municipio de Hidalgo., (2018).
- Diseño, construcción, equipamiento, operación y mantenimiento de una planta desalinizadora en Playas de Rosarito, en el estado de Baja California., (2016).
- Comisión Nacional del Agua. (2019a). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos Avanzados con Fines de Reúso. In *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. www.conagua.gob.mx
- Comisión Nacional del Agua. (2019b). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Desinfección para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento. In *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. www.conagua.gob.mx
- Comisión Nacional del Agua Mexico. (2019). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Integración de un Organismo Operador. In *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. www.conagua.gob.mx

- CONABIO - INIFAP. (1995). *Edafología*.
- Construcción de planta potabilizadora por ósmosis inversa para mejoramiento de la calidad del agua en la Cabecera municipal de San Pedro del Gallo, del estado de Durango, (2013).
- CONAGUA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anal en el acuífero Atlixco-Izúcar de Matamoros (2013), Estado de Puebla. *Diario Oficial de La Federación*, 21.
- CONAGUA. (2017). Estadísticas del agua en México, Edición 2017. *Conagua*. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf
- CONAGUA. (2019). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*.
- CONEVAL. (2015). Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social. *Subsecretaría de Planeación y Evaluación y Desarrollo Regional*, 3.
- Convenio de Estocolmo. (2019). *Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP)*.
- Einav, R., & Lockiec, F. (2003). Environmental aspects of a desalination plant in Ashkelon. *Desalination*, 156, 79–85.
- EPA. (2015). *Using the DPSIR Framework to Develop a Conceptual Model: Technical Support Document*. US Environmental Protection Agency.
- European Environment Agency. (1998). *Guidelines for Data Collection and Processing - EU State of the Environment Report. Annex 3 EEA Annual Report 1998*. European Environment Agency.
- Everard, M., Johnston, P., Santillo, D., & Staddon, C. (2020). The role of ecosystems in mitigation and management of Covid-19 and other zoonoses. *Environmental Science and Policy*, 111, 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.05.017>
- FAO. (2019a). *Driver-Pressure-State-Impact-Response Framework (DPSIR)*. Land & Water. <http://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1026561/>
- FAO. (2019b). *Servicios ecosistémicos y biodiversidad*. <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/>
- Fernández, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, 11(3), 25. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86325090002>
- Flores, C., Ventura, F., Martín-Alonso, J., & Caixach, J. (2013). Occurrence of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in N.E. Spanish surface waters and their removal in a drinking water treatment plant that combines conventional and advanced treatments in parallel lines. *Science of the Total Environment*, 461–462, 618–626. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.026>
- García, J. L. (2019). *Nanofibras biocatalíticas de quitosano para la degradación de retardadores de flama como contaminantes orgánicos persistentes*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*, 7(2), 52–73. <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>
- Gobierno de Puebla. (2019). Plan Estatal de Desarrollo 2019-2024. In *Plan Estatal de Desarrollo 2019-2024*.

- H. Ayuntamiento de Izúcar de Matamoros. (2018). *Plan Municipal de Desarrollo 2018 - 2021* (p. 127). <https://www.izucar.gob.mx/wp-content/uploads/2019/03/PDM-2018-2021-VF.1.pdf>
- Hernández-Sampieri, R. & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Editorial Mc Graw Hill Education.
- Herrera, J. (2016). *Evaluación de la remoción de contaminantes emergentes de aguas superficiales utilizando humedales*. 109.
- IMTA. (2018). La importancia del agua en el planeta y como cuidarla. In *ATL El Portal del Agua desde México*. La importancia del agua en el planeta y como cuidarla
- INAFED. (n.d.). *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*. Retrieved March 24, 2020, from <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21085a.html>
- INEGI. (1997). Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*, 32. http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/1-GEOGRAFIADÉMEXICO/MANUAL_CARAC_EDA_FIS_VS_ENERO_29_2008.pdf
- INEGI. (2000). Síntesis Geográfica del Estado de Puebla. *Inegi*, 3, 1–4. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825222949/702825222949_10.pdf
- INEGI. (2005a). Guía para la Interpretación de Cartografía Climatológica. *Guía Para La Interpretación de Cartografía Climatológica*, 21–33. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/clima/CLIMATIII.pdf
- INEGI. (2005b). Guía para la interpretación de cartografía geológica. *Guía Para La Interpretación de Cartografía Geológica*, 28.
- INEGI. (2010). *Censo de Población y Vivienda*.
- INEGI. (2012). *Guía para la interpretación de cartografía : Uso del suelo y vegetación Serie VI*. 132.
- INEGI. (2021). *Panorama sociodemográfico 2020*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197858.pdf
- Jimenez, B. (2015). Seguridad Hídrica: retos y respuestas, la fase VIII del programa hidrológico internacional de la UNESCO (2014-2021). *Aqua-LAC Revista Del Programa Hidrológico Internacional Para América Latina y El Caribe.*, 7(13), 20–27. <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/AquaLACVol7N1Mar2015VersionWEB.pdf>
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (2003). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. *Diario Oficial de La Federación*, 28. <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6630/1/nom-047-semarnat-2014.pdf>
- Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (Última Reforma DOF 09-01-2015), 1 (1988). http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_050618.pdf
- Lipp, P., Sacher, F. & Baldauf, G. (2010). Removal of organic micro-pollutants during drinking water treatment by nanofiltration and reverse osmosis. *Desalination and Water Treatment*, 13, 226. <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1063>

- Loizia, P., Voukkali, I., Zorpas, A.A., Navarro Pedreño, J., Chatziparaskeva, G., Inglezakis, V. J., & Vardopoulos, I., Doula, M. (2021). Measuring the level of environmental performance in insular areas, through key performed indicators, in the framework of waste strategy development. *Science of the Total Environment*, 753(20).
- Los Vientos de Vaivén Maestro A.C. (2018). *Perforación de un pozo de aprovechamiento de agua salobre y un pozo para descargar el agua de rechazo del sistema, así como la instalación de una planta de osmosis inversa*.
- Meneses, M., Pasqualino, J. C., Céspedes-Sánchez, R., & Castells, F. (2010). Alternatives for reducing the environmental impact of the main residue from a desalination plant. *Journal of Industrial Ecology*, 14, 512–527.
- Metcalf & Eddy, I. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. McGraw-Hill, Inc.
- Mimidis, K., Andrikakou, P., Kallioras, A., & Pliakas, F. (2017). The DPSIR approach to groundwater management for sustainable development in coastal areas: The case of Nea Peramos aquifer system, Kavala, Greece. *Water Utility Journal*, 16(D), 67–80.
- Ministerio para la Transformación Ecológica. (2012). *Introducción al conocimiento y prevención de los Contaminantes Orgánicos Persistentes* (A. y M. A. Ministerio de Agricultura (ed.); Ministerio). V.A. Impresores, S.A. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/productos-quimicos/COPs_tcm30-185064.pdf
- Mittermeier, R. A., Farrell, T. A., Harrison, I. J., Upgren, A. J., & Brooks, T. M. (2018). *Servicios ecosistémicos de agua dulce*. Extracto Del Volumen AGUA DULCE (2010) de La Serie de Libros Conservación de CEMEX. <http://www.cemexnature.com/es/extracto/servicios-ecosistemas-de-agua-dulce/>
- Moreno, J. (2011). Diseño de planta de tratamiento de agua de osmosis inversa para la empresa Dober Osmotech de Colombia Ltda. In *Universidad Autónoma de Occidente* (Vol. 1).
- Navarro, A., Herrera, J. (2006). Contaminantes antropogénicos en descargas de aguas residuales. *Revista Cubana de Química*, XIX(1, 2007), 2333–2336.
- Neville, A., Blanco, H., Brown, C., García, K., Herrichs, T., Lucas, N., Ruadsepp-Heane, C., Simpson, R. D., Scholes, R., Tomich, T., Vira, B., & Zurek, M. (2010). *Ecosystems and Human Well-Being*. IslandPress. <http://www.ecosystemassessments.net/resources/ecosystems-and-human-well-being-a-manual-for-assessment-practitioners.pdf>
- OMS. (2019). *Agua*. Organización Mundial de La Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Onofre, A. (2020). *PTAR Izúcar de Matamoros [Fotografía]*. <https://enlacenoticias.com.mx/?p=40645>
- Organización Panamericana de la Salud. (2005). *Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas*. 1–28.
- Osmonics. (1997). *Pure Water Handbook*.
- PAHO, P. A. H. O. (2007). Ambiente y salud. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 16(30), 10–27.
- Palacios, H., Abraham, J., Hernández, D., Romero, V. H., Zurita, F., & Sulbarán, B. (2017). Sistemas de tratamiento de agua residuales por membranas. *Innovación y Desarrollo Tecnológico Revista Digital*, 9(4), 195–200.

- Pérez, M. L. (1998). *El carbón activado para el tratamiento de agua*. Universidad de Sonora.
- PNUD. (2019). *Objetivos del desarrollo sostenible*. Objetivo 6: Agua y Saneamiento. <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html>
- PNUD México. (2018). Comité Consultivo Nacional para la Gestión Integral de Sustancias Químicas, Compuestos Orgánicos Persistentes y Residuos Peligrosos sujetos a Convenios Internacionales en materia ambiental. In J. Carbajal & A. Rojas (Eds.), *Proyecto 89477* (p. 62). www.mx.undp.org
- PNUMA. (2019). *Chemicals & pollution action*. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/gobiernos-acuerdan-decisiones-historicas-para-erradicar>
- Quiñones, O. & Snyder, S. A. (2009). Occurrence of perfluoroalkyl carboxylates and sulfonates in drinking water utilities and related waters from the United States. *Environmental Science and Technology*, 43, 9089–9095. <https://doi.org/10.1021/%0Aes9024707>
- Ramírez, C. A. (2009). *El Carbón activado para el tratamiento del agua*. Universidad de Sonora.
- Roberts, D. A., Johnston, E. L., & Knott, N. A. (2010). Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: a critical review of published studies. *Water Research*, 44(18), 5117–5128.
- Robledo, V. H., Velázquez, M. A., Montañez, J. L., Pimentel, J. L., Vallejo, A. A., Calvillo, M. D., & Venegas, J. (2017). Hidroquímica y contaminantes emergentes en aguas residuales urbano industriales de Morelia, Michoacán, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(2), 221–235. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.02.04>
- Rodie, B., & Hardenberg, W. (1981). IV Tratamiento de aguas residuales. In M. Continental (Ed.), *Ingeniería sanitaria* (7 ma).
- Secretaría de Salud. (2015). *Estrategia Estatal para la Prevención y el Control del Sobrepeso, la Obesidad y la Diabetes del Estado de Puebla*. <https://www.gob.mx/salud/documentos/estrategia-sod-puebla>
- Secretaría del Convenio de Estocolmo. (2010). *Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes*. Observatorio Del Principio 10 En América Latina y El Caribe. <https://observatoriop10.cepal.org/es/tratados/convenio-estocolmo-contaminantes-organicos-persistentes>
- SEDESOL. (2013). *Unidad de Microrregiones. Cédulas de Información Municipal (SCIM)*. <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/Economia.aspx?entra=nacion&ent=21&mun=085>
- SEMARNAT. (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario Oficial de La Federación*, 1–20.
- SEMARNAT. (2007). *Plan Nacional de Implementación del Convenio de Estocolmo*.
- SEMARNAT. (2010). *Evaluación de la degradación de suelo* (p. 13).
- SEMARNAT. (2016). Plan Nacional de Implementación Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes. *Plan Nacional de Implementación*, 1–78. www.gestionderiesgos.gob.ec
- SEMARNAT, & Dirección de Geomática. (2004). *Degradación del suelo en la República Mexicana*.
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). Sismología de México. In *Sismología de México*. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>

- Servicio Meteorológico Nacional. (2010). *Estación meteorológica 00021132 Izúcar de Matamoros*.
- SOSAPAMIM. (2020). *Sistema Operador de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Izúcar de Matamoros*. <https://www.sosapamim.gob.mx/>
- Steinle-Darling, E. & Reinhard, M. (2008). Nanofiltration for trace organic contaminant removal: Structure, solution, and membrane fouling effects on the rejection of perfluorochemicals. *Environmental Science and Technology*, 42, 5292–5297.
- Steinle-Darling, E., Litwiller, E. & Reinhard, M. (2010). Effects of sorption on the rejection of trace organic contaminants during nanofiltration. *Environmental Science & Technology*, 44(7), 2592–2598. <https://doi.org/10.1021/es902846m>
- Tang, C. Y., Fu, Q. S., Criddle, C. S. & Leckie, J. O. (2007). Effect of flux (transmembrane pressure) and membrane properties on fouling and rejection of reverse osmosis and nanofiltration membranes treating perfluorooctane sulfonate containing wastewater. *Environmental Science and Technology*, 41, 2008. <https://doi.org/10.1021/es062052f>
- Tang, C. Y., Fu, Q. S., Robertson, A. P., Criddle, C. S. & Leckie, J. O. (2006). Use of reverse osmosis membranes to remove perfluorooctane sulfonate (PFOS) from semiconductor wastewater. *Environmental Science and Technology*, 40, 7343. <https://doi.org/10.1021/es060831q>
- Thompson, J., Eaglesham, G., Reungoat, J., Poussade, Y., Bartkow, M., Lawrence, M. & Mueller, J. F. (2011). Removal of PFOS, PFOA and other perfluoroalkyl acids at water reclamation plants in South East Queensland Australia. *Chemosphere*, 82, 9. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.10.040>
- Tiwari, K., Goyal, R., Sarkar, A., & Munoth, P. (2015). Integrated water resources management with special reference to water security in Rajasthan, India. *History*, 41(188), 93–101.
- Tow, E. W., Ersan, M. S., Kum, S., Lee, T., Speth, T. F., Owen, C., Bellona, C., Nadagouda, M. N., Mikelonis, A. M., Westerhoff, P., Mysore, C., Frenkel, V. S., Desilva, V., Walker, W. S., Safulko, A. K., & Ladner, D. A. (2021). Managing and treating per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in membrane concentrates. *AWWA Water Science*, 3(5), 1–23. <https://doi.org/10.1002/laws2.1233>
- Turística Cancún S.de R.L. de C.V. (2019). *Instalación y operación de una planta desalinizadora por ósmosis inversa marca, Biosaving Energy, modelo BSE-SW-400-5R-6M, con tecnología de filtración por membranas de osmosis inversa, con recuperador de energía, automatizada y con medición de caudales d*.
- UNAM. (2014). *Recursos hidricos y contaminación del agua*. http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/RecursosHidricosyContaminacion_25154.pdf
- UNAM, I. de ingeniería. (2010a). Diagnóstico: Organismos Operadores. Puebla: Izúcar de Matamoros. In *Programa de apoyo al desarrollo hidráulico de los estados de Puebla, Oaxaca y Tlaxcala*. http://www.agua.unam.mx/padhpot/assets/cdh/diagnostico_izucarmatamoros2014.pdf
- UNAM, I. de ingeniería. (2010b). Encuesta sobre conocimientos, conductas y actitudes hacia el agua, Izúcar de Matamoros. In *Programa de apoyo al desarrollo hidráulico de los estados de Puebla, Oaxaca y Tlaxcala*.
- UNESCO. (2003). Water for People, Water for Life (Executive Summary). *World Water Assessment Programme*, 36.
- UNESCO. (2016). PHI-VIII: seguridad hídrica: respuestas a los retos locales, regionales y globales

(2014-2021). (PHI)VIII. Programa Hidrológico Internacional, 16.

Wagner, J. (2001). Membrane Filtration Handbook. In OSMONICS (Ed.), *OSMONICS* (Issue Revision 2, p. 129).

Yan, H., Cousins, I. T., Zhang, C. & Zhou, Q. (2015). Perfluoroalkyl acids in municipal landfill leachates from China: Occurrence, fate during leachate treatment and potential impact on groundwater. *Science of the Total Environment*, 524, 23.

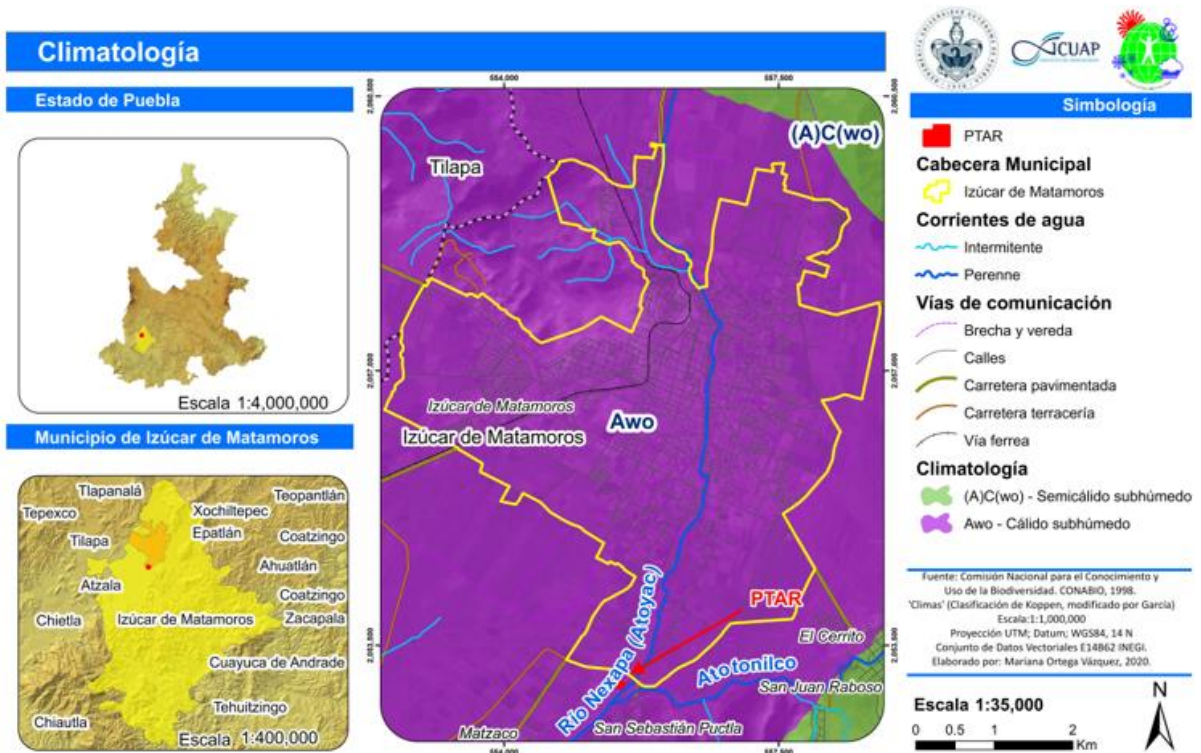
Zeng, C., Tanaka, S., Suzuki, Y., Yukioka, S. & Fujii, S. (2017). Rejection of trace level perfluorohexanoic acid (PFHxA) in pure water by loose nanofiltration membrane. *Journal of Water and Environment Technology*, 15, 120. <https://doi.org/10.2965/jwet.16-072>

ANEXO 1. Descripción biofísica de la cabecera municipal de Izúcar de Matamoros.

1. Climatología

De acuerdo con la clasificación de Köppen, el sistema en estudio cuenta con un clima cálido subhúmedo denominado Aw0 como se puede ver en el Mapa 3. Para hacer la descripción de la cartografía se consultó la Guía para la interpretación de cartografía climatológica (INEGI, 2005a).

- **Aw0:** Que corresponde al grupo de climas A (cálidos húmedos) con una temperatura media anual mayor a 22 °C. Por su tipo (w) subhúmedo con un régimen de lluvias de verano (lo que significa que el mes de máxima precipitación cae dentro del periodo mayo – octubre, y este mes recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año) y sequía en invierno, con porcentaje de lluvia invernal mayor de 10.2. Clasificados por su subtipo (w0) como los más secos de los subhúmedos, con un cociente de P/T menor de 43.2.



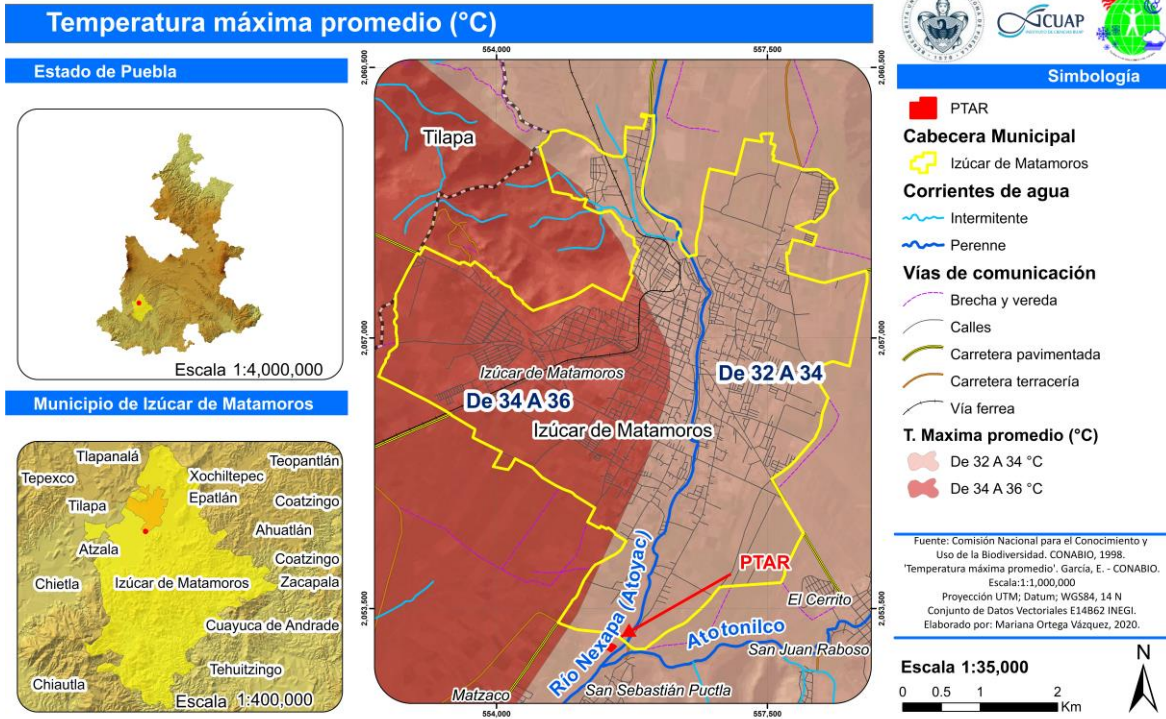
Mapa 3. Climatología (Elaboración propia, 2020).

2. Temperatura, precipitación e intemperismos

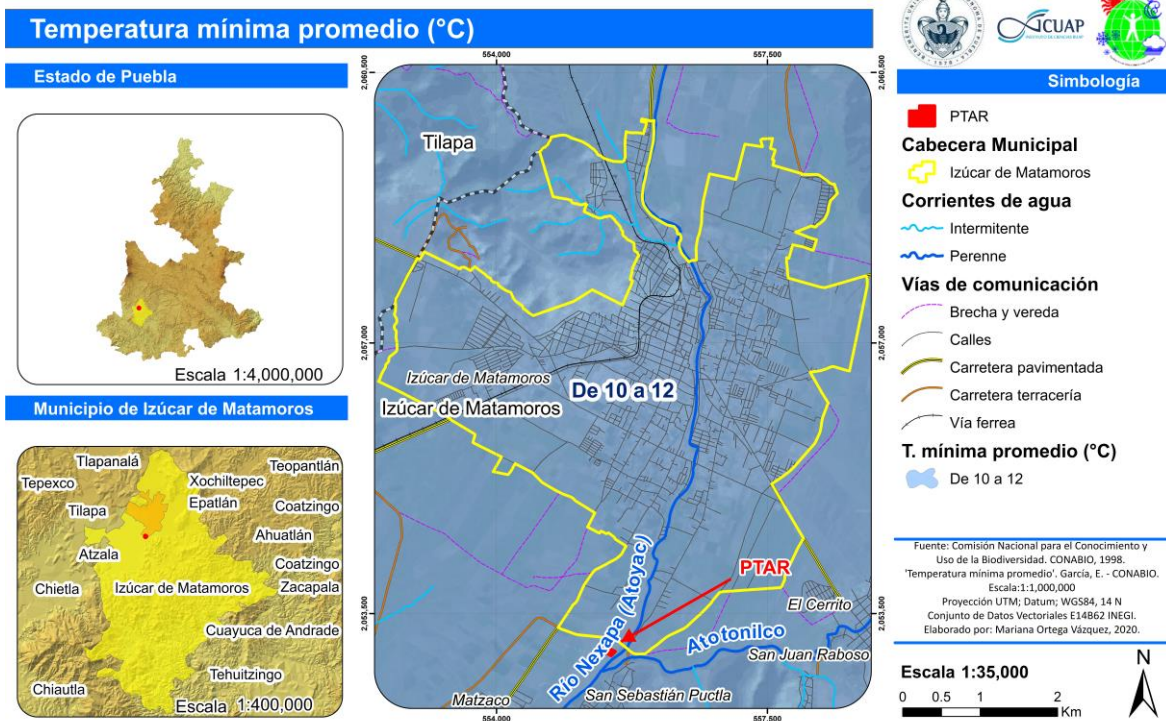
Para describir el comportamiento climatológico se obtuvieron datos del Servicio Meteorológico Nacional, para esto se localizó la estación climatológica del Estado de Puebla, identificada como 00021132 Izúcar de Matamoros, que está ubicada a aproximadamente 5 Km con dirección norte de la PTAR en estudio. Esta estación climatológica brinda datos del periodo de 1951 al año 2010 y su ubicación exacta corresponde a la latitud $18^{\circ}36'44''$ y longitud $98^{\circ}28'05''$, cabe señalar que su altitud es de 1,297 msnm.

Con los datos de la estación climatológica podemos identificar que, en Izúcar de Matamoros, la temperatura media anual es de 22.5°C , mayo es el mes más cálido con temperatura media anual de 25.4°C y enero es el más frío con 19.4°C ; la cantidad de lluvia total anual es de 918.9 mm, en agosto se concentra la máxima precipitación con 875 mm y en marzo la mínima con 25 mm.

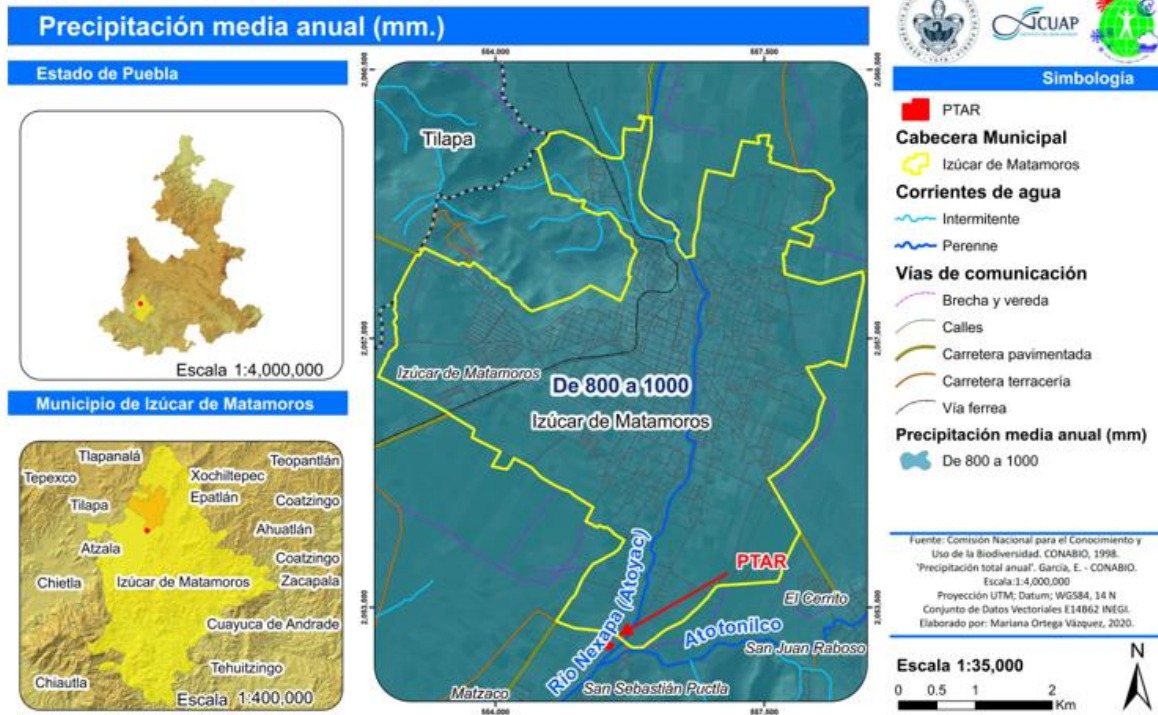
La temperatura máxima promedio representada en el Mapa 4, muestra que la zona de estudio comprende de los 32 a los 36°C , mientras que la del área de la PTAR está ubicada en el rango de 32 a 34°C , este coincide con el dato obtenido de la estación climatológica, que reporta la temperatura máxima mensual y su promedio es de 33.4°C . La temperatura mínima promedio, representada en el Mapa 5, muestra que la zona de estudio se ubica en el rango de 10 a 12°C , lo que coincide con el dato obtenido de la estación climatológica, de 10.6°C . La precipitación media anual, representada en el Mapa 6, muestra que la zona de estudio se ubica en el rango de 800 a 1000 mm, lo que coincide con el dato obtenido de la estación climatológica de 918.9 mm.



Mapa 4. Temperatura máxima promedio (Elaboración propia, 2020).



Mapa 5. Temperatura mínima promedio (Elaboración propia, 2020).



Mapa 6. Precipitación media anual (Elaboración propia, 2020).

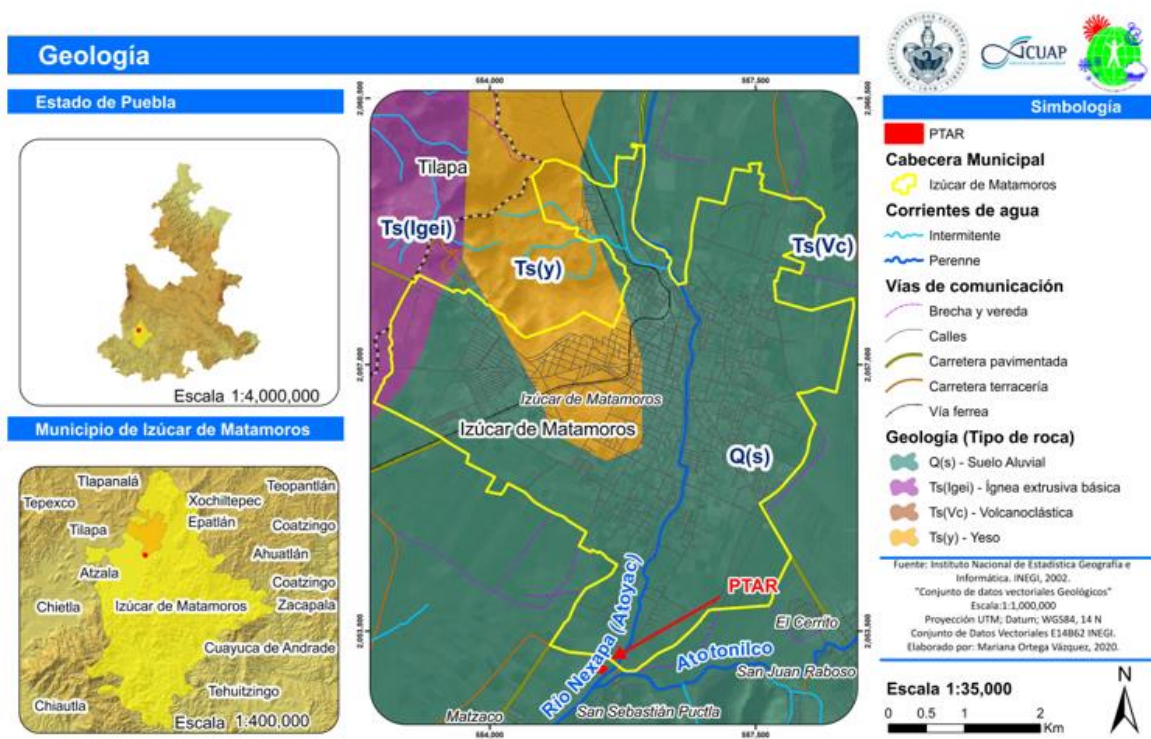
Para conocer la vulnerabilidad de la zona de estudio, se obtuvieron los metadatos proporcionados por el (CENAPRED, 2015), que indican que en la cabecera municipal el riesgo de inundación es medio, mientras que el riesgo de sequía se considera bajo.

3. Geología

La zona de estudio está constituido por tres clases litológicas como se observa en el Mapa 7: Suelos aluviales, y dos unidades cronoestratigráficas; rocas sedimentarias de yeso y rocas ígneas extrusivas básicas, siendo el suelo Aluvial el que caracteriza específicamente la geología del predio donde está construida la PTAR, para hacer la descripción de la cartografía se consultó la Guía para la interpretación de cartografía geológica (INEGI, 2005b).

- **Suelo Aluvial, Q(s):** Suelo de tipo aluvial, de la era cenozoica, del sistema cuaternario. Como resultado de la acción de diversos factores ambientales (acción destructiva y constructiva de los agentes del intemperismo y la erosión, que desnudan y modifican las topofomas y dan pie a la formación de depósitos aluviales y suelos) que han operado sobre los bloques geológicos establecidos con anterioridad (INEGI, 2000).

- **Roca sedimentaria yeso, Ts (y):** A causa de los agentes externos de erosión como agua, viento y hielo y cambios de temperatura, se produce el efecto de meteorización (desintegración y descomposición de las rocas), cuyas partículas son transportadas y depositadas. Conforme se acumulan sedimentos, los materiales se compactan y dan origen a las rocas sedimentarias. El yeso debe su origen a la evaporación de cuerpos restringidos de agua. El yeso pertenece al grupo de los sulfatos.
- **Roca ígnea extrusiva básico, Ts (lgei):** Se originan a partir de material fundido (magma) en el interior de la corteza terrestre, el cual está sometido a temperatura y presión muy elevada. Cuando el magma llega a la superficie terrestre, al enfriarse y solidificarse forma este tipo de rocas. Estas rocas se denominan básicas por su contenido mineralógico predominante en sílice que contienen entre 45% y 52%.



Mapa7. Geología, fallas y fracturas (Elaboración propia, 2020).

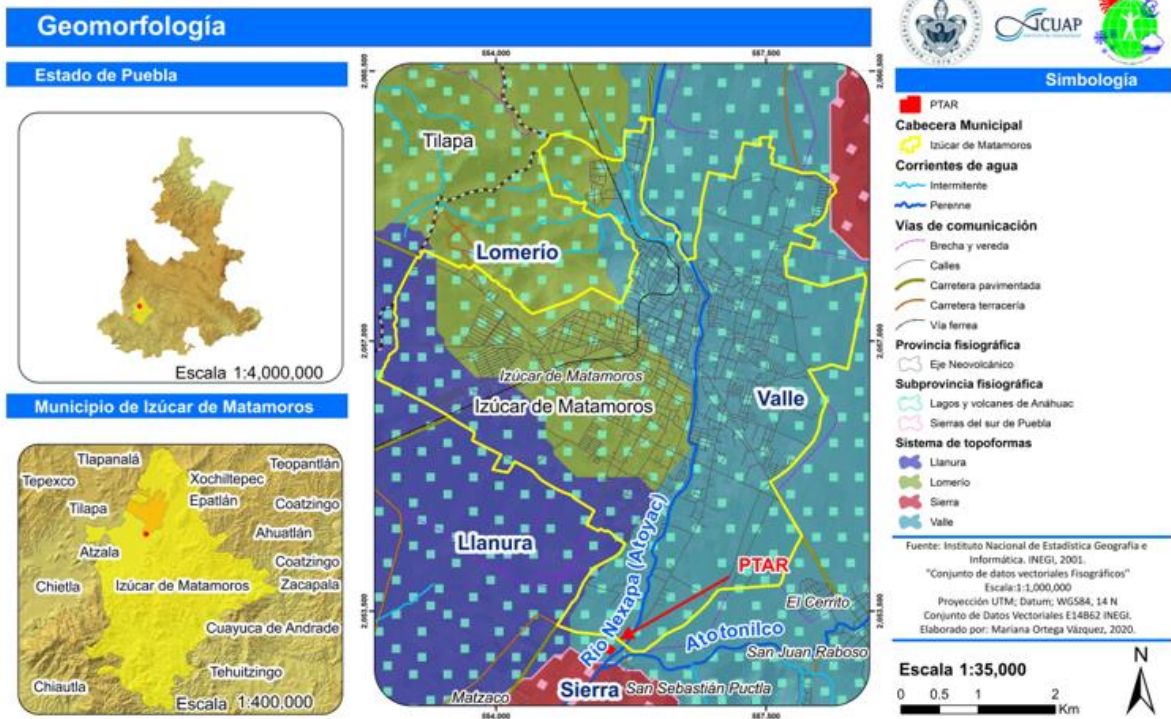
4. Geomorfología y sismicidad

El municipio de Izúcar de Matamoros se localiza en la parte suroeste del Estado de Puebla. Sus coordenadas geográficas son: los paralelos 18° 22' 06" y 18° 42' 18" de latitud norte, y los meridianos 98° 19' 18" y 99° 33' 24" de longitud occidental y sus colindancias son: al norte limita con Tepeojuma, al sur limita con Chiautla de Tapia, al oeste limita con Xochiltepec, San Martín Totoltepec, Epatlán, Ahuatlán y Tehuitzingo y al poniente limita con Tlapanala, Tilapa, Atzala y Chietla.

El territorio del municipio tiene una superficie de 537.33 kilómetros cuadrados, lo que lo ubica en el lugar seis con respecto a los demás municipios del Estado de Puebla (INAFED, n.d.).

En el Mapa 8, se aprecia que la zona de estudio se localiza en la provincia fisiográfica denominada: Eje Neovolcánico. En lo que respecta a la subprovincia fisiográfica, se observa que este corresponde a Lagos y Volcanes de Anáhuac, mientras que la PTAR está asentada sobre un Valle.

- **Eje Neovolcánico:** Es una de las provincias con mayor variación de relieve y tipos de rocas. Se extiende a lo largo de una ancha faja de 130 Km desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México. Esta cordillera es la más alta del país y por esta característica algunas de sus cimas se encuentran coronadas de nieve permanentemente. (INEGI, 1997)
- **Lagos y volcanes Anáhuac:** Es la subprovincia más extensa de las catorce que integran al Eje Neovolcánico; en ella quedan comprendidas las ciudades de Puebla, Toluca, Pachuca, Tlaxcala, Cuernavaca y México. La subprovincia consta de sierras volcánicas o grandes aparatos individuales que alternan con amplias llanuras formadas, en su mayoría, por vasos lacustres. En el Estado de Puebla esta subprovincia es la que abarca mayor superficie, ya que 35.93% de su territorio pertenece a ella.
- **Valle:** Esta topoforma es una depresión de la superficie entre dos vertientes. Generalmente por la vertiente de un valle circulan las aguas de un río.



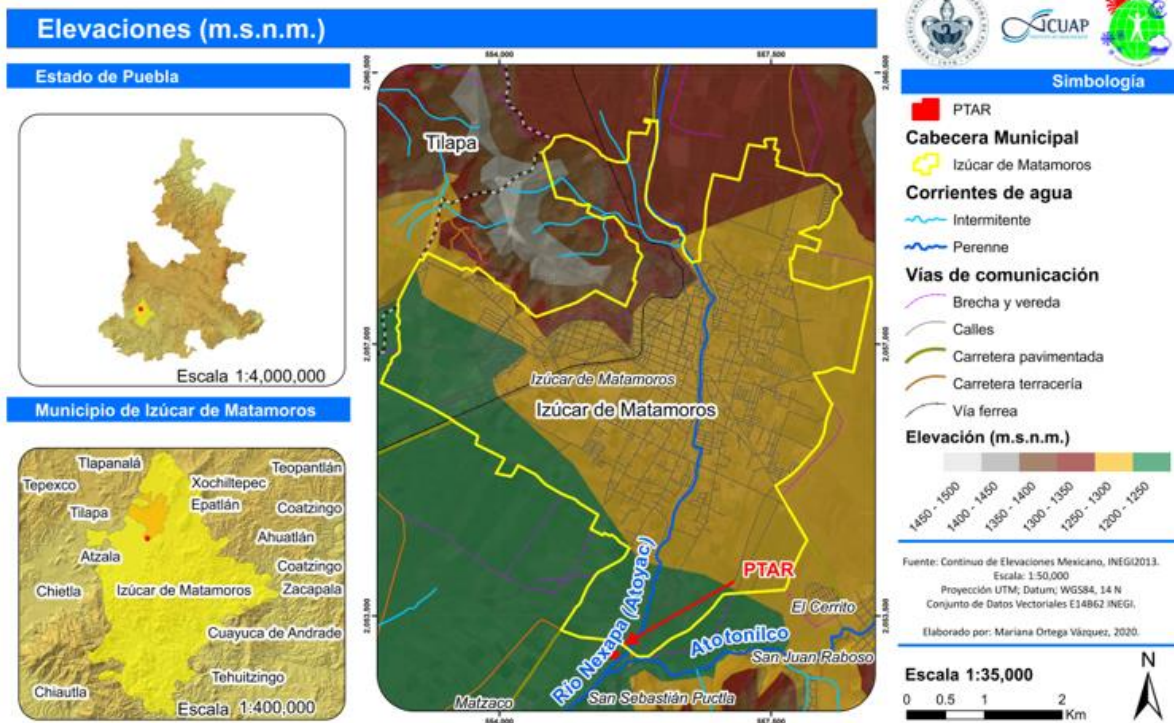
Mapa 8. Geomorfología (Elaboración propia, 2020).

Con fines de diseño antisísmico, la República Mexicana fue dividida por el Servicio Geológico Mexicano en cuatro zonas sísmicas, utilizando los catálogos de sismos del país desde inicios de siglo.

Dentro de esta clasificación la zona de estudio se encuentra comprendido entre las zonas B y C que son intermedias, ya que en ellas los sismos se registran no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo. Sin embargo, la PTAR se encuentra dentro de la zona C (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

5. Elevaciones M.S.N.M.

En el Mapa 9 se observa que la zona de estudio se ubica en una altura sobre el nivel del mar entre los 1200 y 1450 M.S.N.M.



Mapa 9. Elevaciones M.S.N.M. (Elaboración propia, 2020).

6. Edafología, permeabilidad y degradación del suelo

Las unidades de suelo presentes en la zona según (CONABIO - INIFAP, 1995), son las siguientes: Vertisol pélico, Litosol y Poblado, sin embargo, el suelo donde se ubica la PTAR en estudio corresponde a **Vertisol pélico** como puede observarse en el Mapa 10.

- **Vp, Vertisol pélico:** Éstos se han originado de rocas areniscas, calizas o ígneas básicas, las cuales al ser intemperizadas forman materiales moderadamente finos (migajones arcillosos o arcilloarenosos) o muy finos (arcillas). El color que presentan es gris oscuro en los vertisoles pélicos. Estos suelos tienen una alta fertilidad; sin embargo, su utilización en las actividades agropecuarias se ve limitada con frecuencia por el alto contenido de arcillas expandibles, que ocasiona un drenaje lento y, como consecuencia, el encharcamiento en la temporada de lluvias; mientras que en la época seca del año se agrietan y endurecen, dificultando su manejo. A pesar de esto, si se utiliza la tecnología adecuada se pueden obtener altos rendimientos, por lo que actualmente se dedican a la agricultura de riego, agricultura de temporal y pastizales inducidos (INEGI, 2000).

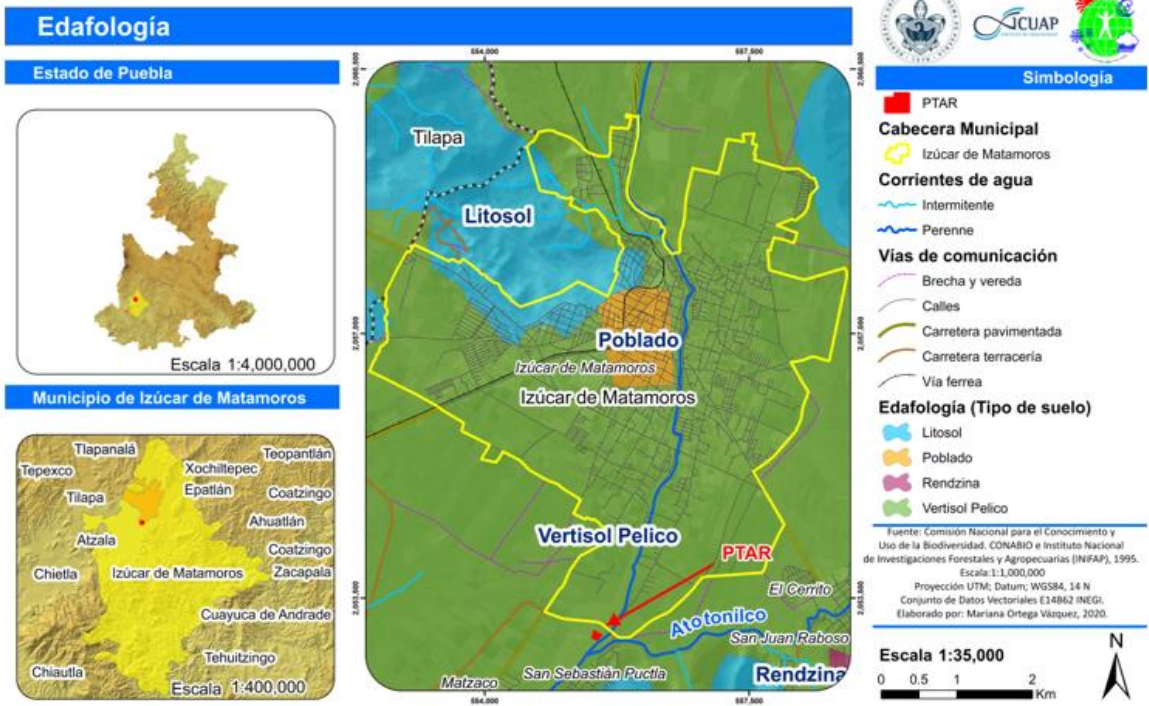
- **Litosol:** Son los suelos más abundantes del país, ya que se encuentra en todos los climas. Se caracterizan por su profundidad menor de 10 cm, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. El uso de estos suelos depende de la vegetación que lo cubre, se puede llevar a cabo pastoreo o agricultura.
- **Poblado:** Zona de asentamientos humanos.

Estas unidades de suelo presentan una cierta permeabilidad como puede observarse en el Mapa 11, en particular el suelo denominado Vertisol pélico presenta una permeabilidad baja, mientras que en la zona encontramos también una zona de permeabilidad media.

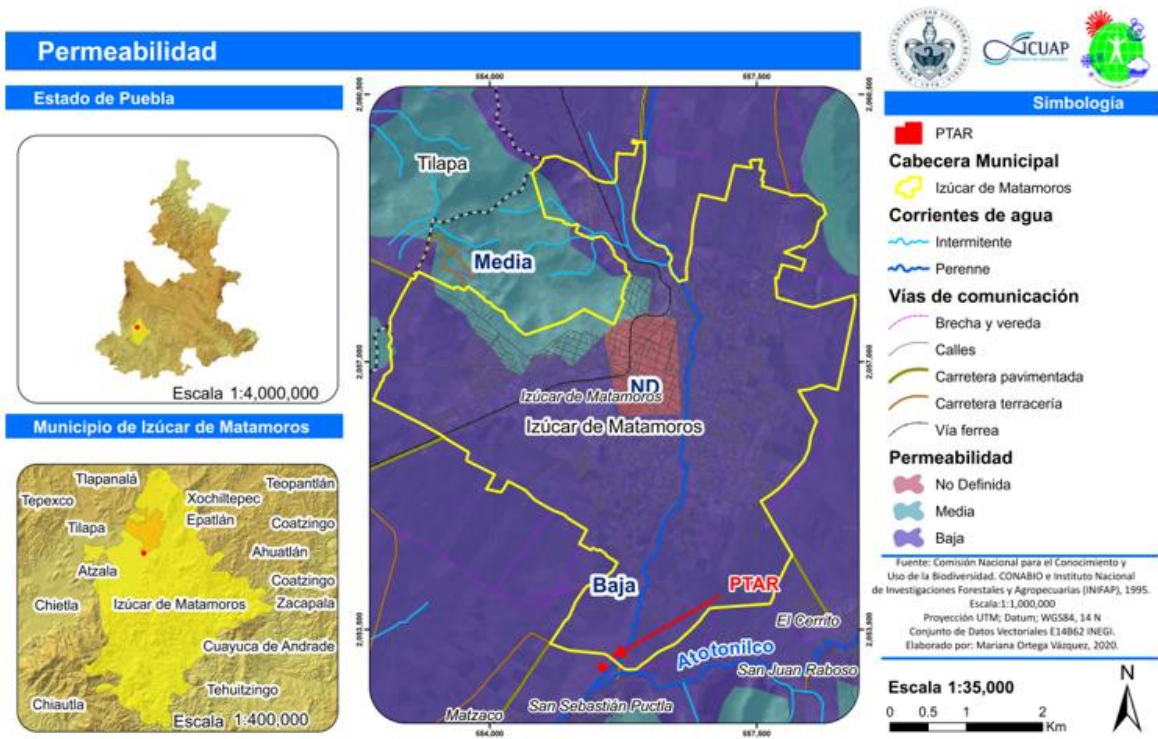
Cuando hablamos de la degradación del suelo debemos entender que diferentes procesos ocasionan su deterioro, los cuales provocan una disminución de su productividad biológica o de su biodiversidad, así como cambios físicos y químicos irreversibles (compactación, cementación, pérdida de carbono orgánico, salinidad, entre otros).

Dentro del sistema de estudio, en el Mapa 12 se observan tres tipos de degradación, que son los siguientes:

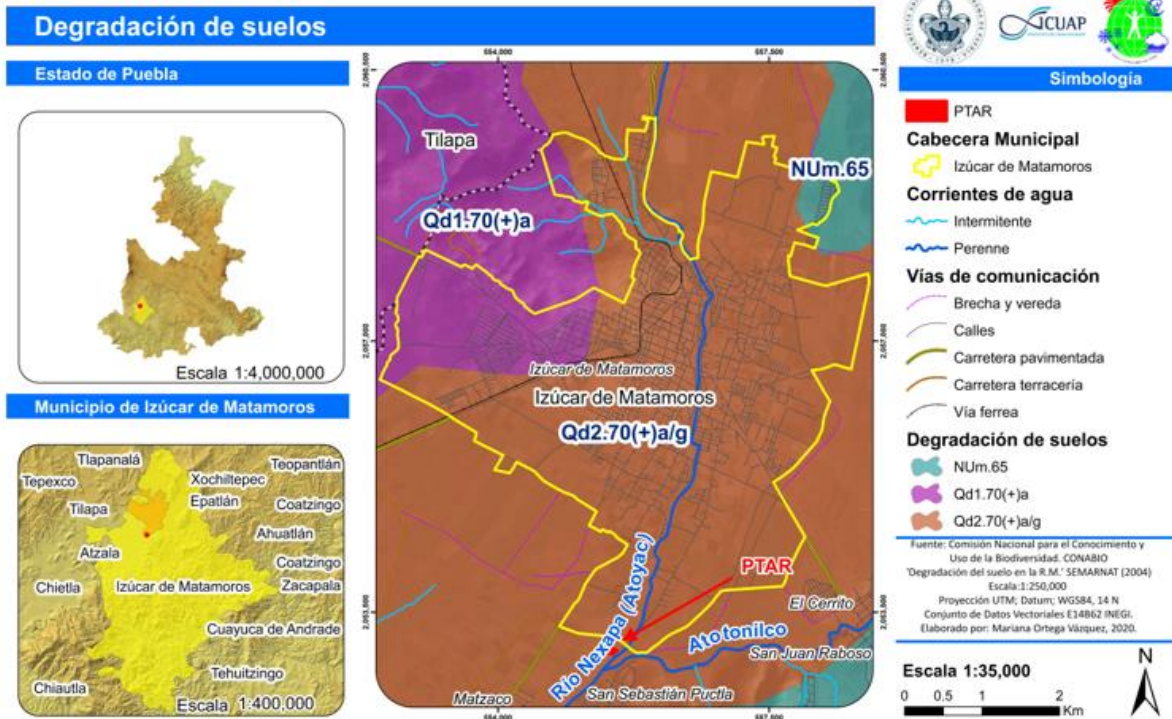
- **Qd2.70(+)/a/g:** Esto significa que se ha producido (Q) degradación química, (d) que provoca declinación de la fertilidad, (2) con degradación moderada con una marcada reducción en su productividad (.70) con 70% de afectación por el proceso de degradación, siendo los factores que causan la degradación (a) las actividades agrícolas y (g) por el sobrepastoreo (SEMARNAT, 2010).
- **Qd1.70(+)/a:** La degradación se ha producido (Q) degradación química, (d) que provoca declinación de la fertilidad, (2) con degradación ligera que provoca una reducción apenas perceptible en su productividad (.70) con 70% de afectación por el proceso de degradación, siendo el factor que causa la degradación (a) las actividades agrícolas.
- **NUm.65:** Son terrenos sin uso debido a que son (NUm) regiones áridas montañosas (.65) con 65% de extensión afectada por un proceso degradativo.



Mapa 10. Edafología (Elaboración propia, 2020).



Mapa 11. Permeabilidad del suelo (Elaboración propia, 2020).



Mapa 12. Degradación de suelos (Elaboración propia, 2020).

7. Hidrología superficial

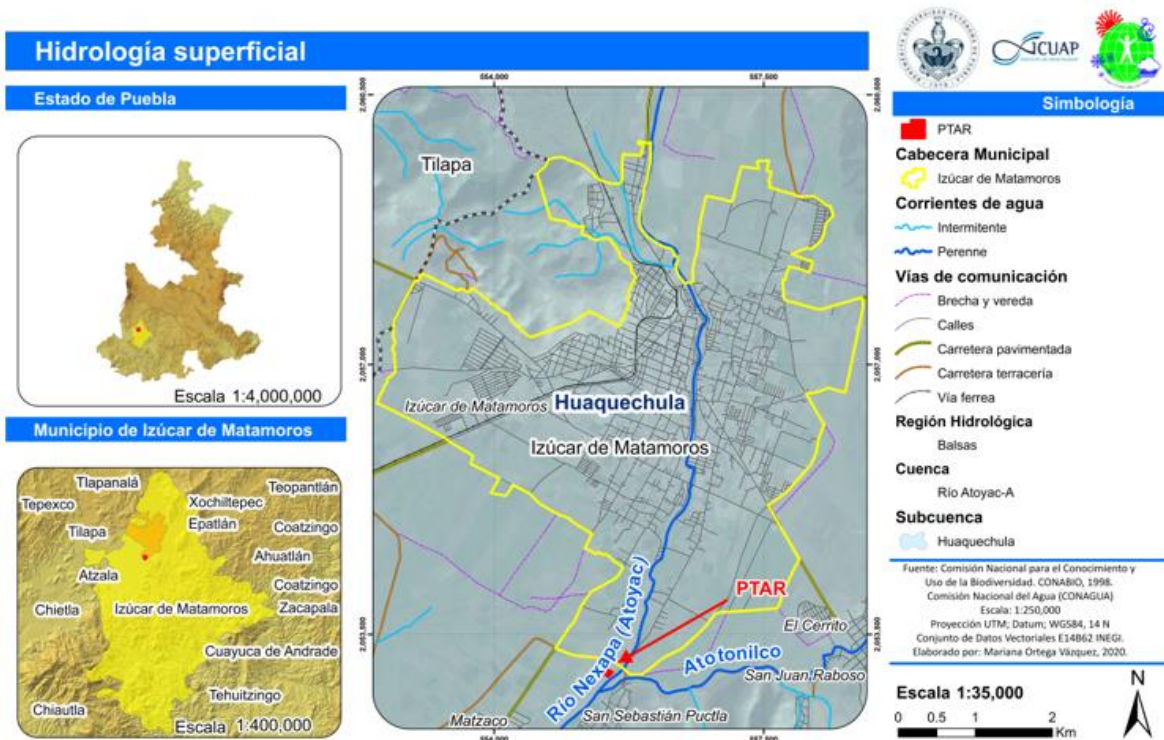
La zona de estudio se encuentra dentro de la Región Hidrológica (RH-18) Río Balsas, en la Cuenca del Río Atoyac y en la Subcuenca denominada Huaquechula, tal como se observa en el Mapa 13.

- Región Hidrológica 18 - Río Balsas:** Esta región hidrológica es una de las más importantes del país debido a que está constituida por ocho estados y 420 municipios, que representan el 6% de la superficie del territorio nacional. Esta región está subdividida en 10 cuencas, de las cuales, cuatro de ellas se encuentran parcialmente incluidas en el territorio poblano: (A) Río Atoyac, (B) Río Balsas – Mezcala, (E) Río Tlapaneco y (F) Río Grande de Amacuzac, estos suman en conjunto aproximadamente 59.014% de la superficie estatal. (INEGI, 2000)
- Cuenca del Río Atoyac:** Constituye la porción oriental de la región, incluye a la mayor parte de las zonas centro, oeste y suroeste de la entidad, que representan 57.23% de la superficie del estado. El río Atoyac es la corriente más importante del estado; se forma a partir de la unión de los ríos San Martín o Frío, de Puebla y Zahuapan de Tlaxcala. A lo largo del Atoyac,

recibe las aportaciones de las corrientes permanentes de los ríos Nexapa, Mixteco y Tlapaneco.

Dentro de Puebla, la cuenca del Atoyac incluye a las subcuencas: A, Río Atoyac-Tehuiztzingo; B, Atoyac-Balcón del Diablo; C, Presa Miguel Ávila Camacho; D, Atoyac-San Martín Texmelucan; E, Río Nexapa; F, Río Mixteco; G, Río Acatlán; H, Laguna de Totolcingo y J, Alseseca. Estas subcuencas están representadas por corrientes menores como las de los ríos Alseseca, Huehuetlán, Laxamilpa y otros. (INEGI, 2000).

- Subcuenca Huaquechula:** Esta se ubica en el Estado de Puebla. Comprende en su totalidad los municipios de San Nicolás de los Ranchos, Nealtican, Tianguismanalco, Santa Isabel Cholula, Atlixco, San Diego la Meza Tochimiltzingo, Tepeojuma, Tlapanalá, Tilapa, Atzala, Epatlán, San Martín Totoltepec y Xochiltepec, y la mayor parte de Calpan, San Jerónimo Tecuanipan, Ocoyucan, Tochimilco, Atzitzihuacan, Huaquechula, Tepexco, Chietla e Izúcar de Matamoros. La superficie total es de 2 299.3 Km² (Cesar et al., 2020).



Mapa 13. Hidrología superficial (Elaboración propia, 2020).

8. Hidrología subterránea

La zona de estudio se encuentra dentro del acuífero Atlixco-Izúcar de Matamoros. El acuífero se considera en general de tipo libre presentando condiciones de buena permeabilidad. La dirección de flujo de aguas subterráneas tiende a seguir la pendiente del Valle. (CONAGUA, 2015).

En estudios previos se observó que en general el agua es apropiada para usos agrícolas, en la zona las rocas calcáreas y yesíferas proporcionan agua altamente sulfatada, sin embargo, estas son utilizadas para el riego de caña de azúcar. La extracción total anual de agua subterránea en la zona es 129.06 mm³/año, lo cual se destina principalmente para el uso agrícola. (CONAGUA, 2015)

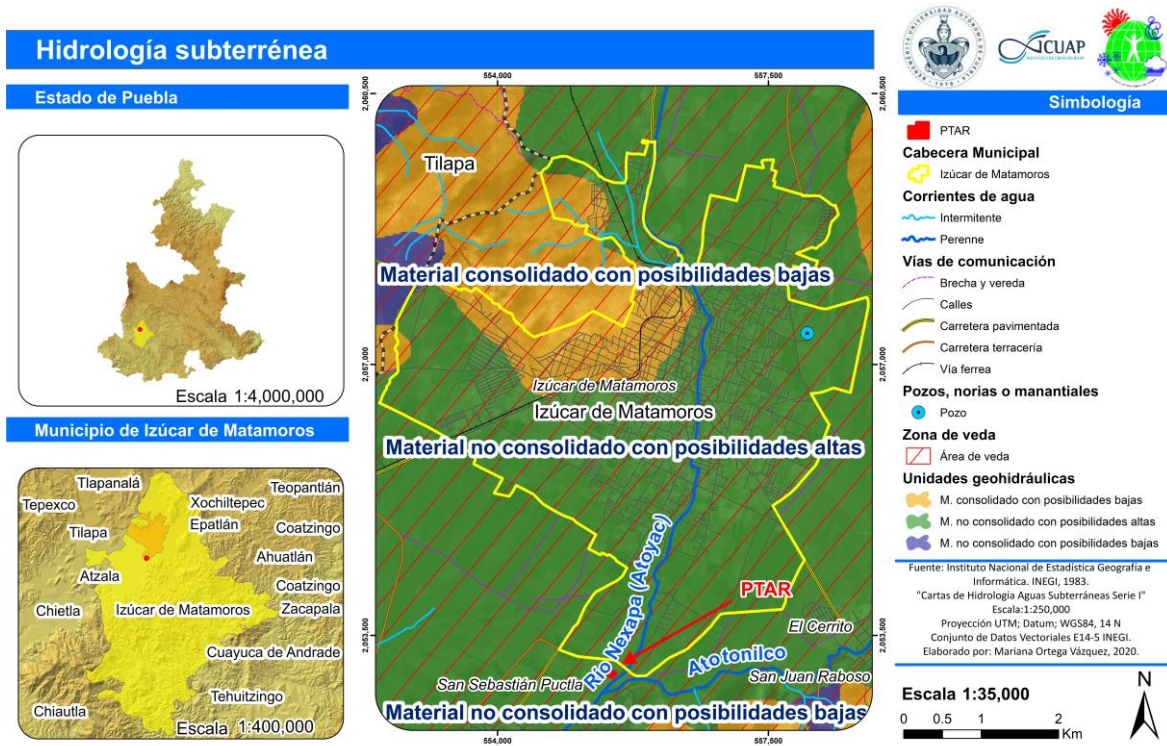
Se aprecian dos zonas principales de recarga al acuífero del Atlixco-Izúcar de Matamoros, una se localiza en las estribaciones de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl, y la otra en las estribaciones de las Sierras de Zoapiltepec, Teyuca y Vaquería. También se observan recargas provenientes del valle de Epatlán y es probable que existan aportaciones de las montañas localizadas al sur de Matamoros.

El acuífero del Atlixco-Izúcar de Matamoros, se encuentra en equilibrio dinámico, debido a que el volumen que entra es mayor al volumen que sale, con un cambio de almacenamiento con valor positivo (CONAGUA, 2015).

En el Mapa 14 de la zona en estudio, se observa que existe un área de veda, estas son áreas específicas de las regiones hidrológicas, cuencas hidrológicas o acuíferos, en las cuales no se autorizan aprovechamientos de agua adicionales a los establecidos legalmente y éstos se controlan mediante reglamentos específicos, en virtud del deterioro del agua en cantidad o calidad, por la afectación a la sustentabilidad hidrológica, o por el daño a cuerpos de agua superficiales o subterráneos.

La unidad geohidráulica se denomina, material no consolidado con posibilidades altas de permeabilidad en la mayor parte de la superficie del área de estudio. Dentro de los materiales no consolidados, se clasifican los conglomerados y los aluviones del Cuaternario, poco compactados, bien clasificados, sin cementación y con muy escasa arcilla que se encuentran destruidos en los valles y cauces de los ríos; mismos que albergan a las principales zonas de explotación y asentamientos humanos. En estos la permeabilidad puede variar sin embargo tiene una buena permeabilidad en general por lo que se considera con posibilidades altas de permeabilidad. Se consideran materiales

con permeabilidad alta a las rocas con porosidad, fracturas abiertas e intercomunicadas entre sí, libres de obstrucciones como arcillas o ventillas. En otro caso, si estas rocas y materiales granulares se encuentran en zonas montañosas, pueden servir como áreas de infiltración o recarga y transmitir el agua hacia los valles (INEGI, 2000).



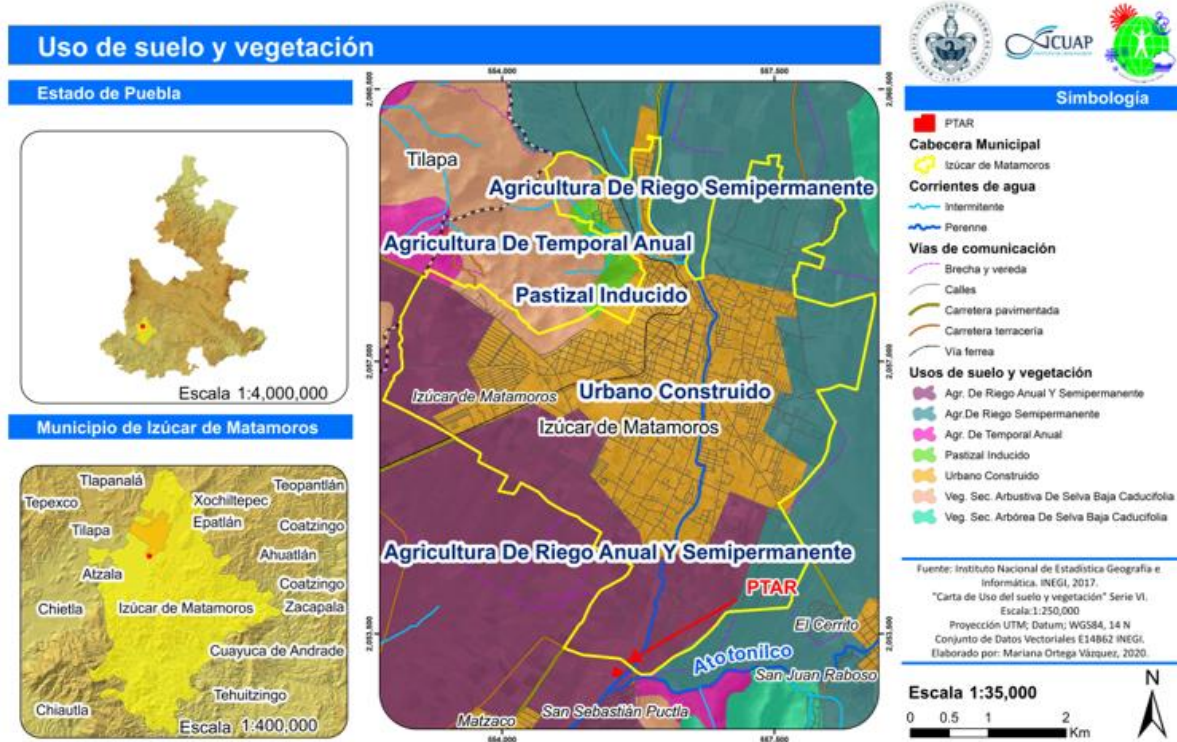
Mapa 14. Hidrología subterránea (Elaboración propia, 2020).

9. Tipos de uso de suelo y vegetación

De acuerdo con la Guía para la interpretación de cartografía Uso del Suelo y Vegetación Serie VI de INEGI 2012, dentro de la zona de estudio existen cinco tipos diferentes de uso de suelo y vegetación como se observa en el Mapa 15.; sin embargo, los que presentan mayor extensión son:

- **Agricultura de riego anual y semipermanente:** Para esta actividad se utiliza agua suplementaria para el desarrollo de los cultivos durante el ciclo agrícola. Al ser anual y semipermanente se refiere a que su ciclo vegetativo dura solamente un año o menos, por ejemplo, maíz, trigo, sorgo o a que su ciclo vegetativo dura entre uno y diez años, como el caso de la papaya, la piña y la caña de azúcar (INEGI, 2012).

- **Agricultura de riego semipermanente:** Para esta actividad se utiliza agua suplementaria para el desarrollo de los cultivos durante el ciclo agrícola. Por su carácter semipermanente su ciclo vegetativo dura entre uno y diez años, como el caso de la papaya, la piña y la caña de azúcar (INEGI, 2012).
- **Urbano construido:** Se considera un conglomerado demográfico, que incluye sus elementos naturales y las obras existentes en el territorio.



Mapa 15. Usos de suelo y vegetación (Elaboración propia, 2020).

ANEXO 2. Descripción biofísica de la cabecera municipal de Izúcar de Matamoros.

A continuación, se muestran las relaciones causales encontradas a partir de las Fuerzas Motrices que originan Presiones que provocan cambios en el estado e inducen a la generación de Impactos y sus respectivas Respuestas o intervenciones propuestas.

a) Relaciones causales encontradas a partir de la Fuerza Motriz 1 y sus Respuestas

Fuerzas Motrices	Presiones	Estados	Impactos
FM1	P1	E2	I1
Gasto medio suministrado de 134 L/s supera la capacidad instalada de la PTAR que puede tratar hasta 90 L/s	El volumen de agua residual que llega al influente de la PTAR es una mezcla procedente de diferentes fuentes puntuales.	Calidad baja del influente y efluente de la PTAR (incluyendo COP). No cumple con los parámetros que exige la norma	La irrigación de los cultivos con agua proveniente del río provoca su contaminación con COP
		E5	I2
		Fenómeno de creciente urbanización y saturación de los servicios públicos	La calidad del agua que llega al influente de la PTAR responde a variaciones en la concentración de los contaminantes. Su diseño actual resulta en el incumplimiento de la normatividad aplicable vigente.
Respuestas			
Respuesta 1 → FM1 Políticas de construcción: Contar con políticas de construcción y ordenamiento territorial	Respuesta 4 → P1 Limitaciones a descargas: Aplicar normatividad vigente a descargas de las fuentes (restaurantes, clínicas, rastros, hospitales)	Respuesta 9 → E2 Monitorear la calidad del agua y establecer criterios de calidad desde la fuente.	Respuesta 10 → I1 Monitoreo del éxito a decisiones y normas implementadas a descargas (normatividad y tecnología).
		Respuesta 6 → E2 Llevar a cabo investigación científica para actualizar la PTAR con una tecnología mejorada que evite que los COP lleguen al río.	
		Respuesta 7 → E5 Planeación comunitaria: Asistir al propietario para implementar ecotecnias y buenas prácticas de uso de agua	Respuesta 4 → I1 e I2 Limitaciones a descargas: Aplicar normatividad vigente a descargas de las fuentes (restaurantes, clínicas, rastros, hospitales)
		Respuesta 1 → E5 Políticas de construcción: Contar con políticas de construcción y ordenamiento territorial	Respuesta 9 → I2 Monitorear la calidad del agua y establecer criterios de calidad desde la fuente

b) Relaciones causales encontradas a partir de la Fuerza Motriz 2 y sus Respuestas

Fuerzas Motrices	Presiones	Estados	Impactos	
FM2	P1	E1	I1	
Existe un crecimiento gradual pero constante de la vivienda en el municipio conectada al drenaje.	El volumen de agua residual que llega al influente de la PTAR es una mezcla procedente de diferentes fuentes puntuales.	Variabilidad de concentración dependiendo de condiciones ambientales y actividades antropogénicas	La irrigación de los cultivos con agua proveniente del río provoca su contaminación con COP.	
		E2	I2	
	Alrededor de 300 COP llegan a la PTAR.	Calidad baja del influente y efluente de la PTAR (incluyendo COP). No cumple con los parámetros que exige la norma.	La calidad del influente de la PTAR responde a variaciones en la concentración de los contaminantes.	
		P2	E3	I3
		Actualmente la PTAR no opera de manera constante. La tecnología de la PTAR no es suficiente para lograr la remoción de los COP.	La contaminación del río Nexapa ha afectado el valor estético del paisaje	
	E5	I4		
	Fenómeno de creciente urbanización y saturación de los servicios públicos.	Los COP que escapan al tratamiento pueden (llegar a contaminar diferentes compartimentos ambientales y causar enfermedades.		
Respuestas				
Respuesta 1 → FM2 Políticas de construcción: Contar con políticas de construcción y ordenamiento territorial	Respuesta 4 → P1 y P2 Limitaciones a descargas: Aplicar normatividad vigente a descargas de las fuentes (restaurantes, clínicas, rastros, hospitales)	Respuesta 9 → E1 y E2 Monitorear la calidad del agua y establecer criterios de calidad.	Respuesta 4 → I1 e I2 Limitaciones a descargas: Aplicar normatividad vigente a descargas de las fuentes (restaurantes, clínicas, rastros, hospitales)	
		Respuesta 6 → E2 y E3 Llevar a cabo investigación científica para actualizar la PTAR con una tecnología mejorada que evite que los COP lleguen al río.	Respuesta 9 → I2 Monitorear la calidad del agua y establecer criterios de calidad.	
		Respuesta 10 → E3 Monitoreo del éxito a decisiones y normas implementadas a descargas (normatividad y tecnología).		

		<p>Respuesta 7 → E5 Planeación comunitaria: Asistir al propietario para implementar ecotecnias y buenas prácticas de uso de agua</p>	<p>Respuesta 11 → I3 e I4 Mitigar cargas sobre personas o ambiente por pérdida de beneficios.</p>
		<p>Respuesta 1 → E5 Políticas de construcción: Contar con políticas de construcción y ordenamiento territorial</p>	<p>Respuesta 6 → I4 Llevar a cabo investigación científica para actualizar la PTAR con una tecnología mejorada que evite que los COP lleguen al río</p>
			<p>Respuesta 10 → I1 E I4 Monitoreo del éxito a decisiones y normas implementadas a descargas (normatividad y tecnología).</p>

c) Relaciones causales encontradas a partir de la Fuerza Motriz 3 y sus Respuestas

Fuerzas Motrices	Presiones	Estados	Impactos
FM3	P2	E2	I1
El sistema de drenaje capta el agua residual proveniente de diversas fuentes que descargan COP tales como hospitales, veterinarias, clínicas de belleza, talleres mecánicos, restaurantes, rastros, etc.	Alrededor de 300 COP llegan a la PTAR	Calidad baja del influente y efluente de la PTAR (incluyendo COP). No cumple con los parámetros que exige la norma.	Irrigación de los cultivos con agua proveniente del río provoca su contaminación con COP
		E4	I6
		Según datos de la Secretaría de Salud, dentro de las principales causas de mortalidad se encuentran, enfermedades infecciosas y parasitarias.	El saneamiento inadecuado de agua en México genera una sobrecarga del sector salud con un costo económico asociado que asciende a 5 800 millones de dólares al año
Respuestas			
Respuesta 4 → FM3 Limitaciones a descargas: Aplicar normatividad vigente a descargas de las fuentes (restaurantes, clínicas, rastros, hospitales)	Respuesta 4 → P2 Limitaciones a descargas: Aplicar normatividad vigente a descargas de las fuentes (restaurantes, clínicas, rastros, hospitales)	Respuesta 9 → E2 Monitorear la calidad del agua y establecer criterios de calidad.	Respuesta 4 → I1 Limitaciones a descargas: Aplicar normatividad vigente a descargas de las fuentes (restaurantes, clínicas, rastros, hospitales)
		Respuesta 6 → E2 Llevar a cabo investigación científica para actualizar la PTAR con una tecnología mejorada que evite que los COP lleguen al río.	
		Respuesta 8 → E4 Documentar las enfermedades registradas asociadas a la mala calidad del agua y su respectivo tratamiento médico.	Respuesta 12 → I6 Estimar el costo-beneficio de las decisiones potenciales o implementadas

d) Relaciones causales encontradas a partir de la Fuerza Motriz 4 y sus Respuestas

Fuerzas Motrices	Presiones	Estados	Impactos
FM4	P2	E2	I1
La regulación existente es insuficiente y no implementada	Alrededor de 300 COP llegan a la PTAR	Calidad baja del influente y efluente de la PTAR (incluyendo COP). No cumple con los parámetros que exige la norma.	Irrigación de los cultivos con agua proveniente del río provoca su contaminación con COP
		E6	I6
		Las enfermedades infecciosas como la tifoidea, disentería, gastroenteritis y cólera están asociadas a la mala calidad del agua	El saneamiento inadecuado de agua en México genera una sobrecarga del sector salud con un costo económico asociado que asciende a 5 800 millones de dólares al año
Respuestas			
Respuesta 4 → FM4 Limitaciones a descargas: Aplicar normatividad vigente a descargas de las fuentes (restaurantes, clínicas, rastros, hospitales)	Respuesta 4 → P2 Limitaciones a descargas: Aplicar normatividad vigente a descargas de las fuentes (restaurantes, clínicas, rastros, hospitales)	Respuesta 9 → E2 Monitorear la calidad del agua y establecer criterios de calidad.	Respuesta 4 → I1 Limitaciones a descargas: Aplicar normatividad vigente a descargas de las fuentes (restaurantes, clínicas, rastros, hospitales)
		Respuesta 6 → E2 Llevar a cabo investigación científica para actualizar la PTAR con una tecnología mejorada que evite que los COP lleguen al río.	
		Respuesta 8 → E6 Documentar las enfermedades registradas asociadas a la mala calidad del agua y su respectivo tratamiento médico.	Respuesta 12 → I6 Estimar el costo-beneficio de las decisiones potenciales o implementadas
Respuesta 6 → E6 Llevar a cabo investigación científica para actualizar la PTAR con una tecnología mejorada que evite que los COP lleguen al río.			

e) Relaciones causales encontradas a partir de la Fuerza Motriz 5 y sus Respuestas

Fuerzas Motrices	Presiones	Estados	Impactos
FM5	P4	E3	I3
Poca acción participativa de los habitantes de la cabecera municipal	La población no implementa con regularidad acciones para ahorrar agua.	Actualmente la PTAR no opera de manera constante. La tecnología de la PTAR no es suficiente para lograr la remoción de los COP.	La contaminación del río Nexapa ha afectado el valor estético del paisaje
Respuestas			
Respuesta 2 → FM5 Contar con políticas culturales, para brindar educación ambiental, divulgación y capacitación.	Respuesta 5 → P4 Proporcionar información para mejorar comportamientos respecto a la gestión del agua	Respuesta 6 → E3 Llevar a cabo investigación científica para actualizar la PTAR con una tecnología mejorada que evite que los COP lleguen al río Respuesta 10 → E3 Monitoreo del éxito a decisiones y normas implementadas a descargas (normatividad y tecnología).	Respuesta 11 → I3 Mitigar cargas sobre personas o ambiente por pérdida de beneficios.

f) Relaciones causales encontradas a partir de la Fuerza Motriz 6 y sus Respuestas

Fuerzas Motrices	Presiones	Estados	Impactos
FM6	P3	E3	I5
<p>Manejo del tratamiento basado en organismo descentralizado. No hay articulación entre los tomadores de decisiones.</p>	<p>El patrón de consumo de agua potable va al alza con tendencia rebasar la capacidad y la tecnología instalada en la PTAR</p>	<p>Actualmente la PTAR no opera de manera constante. La tecnología de la PTAR no es suficiente para lograr la remoción de los COP.</p>	<p>El personal que se encarga de la operación de la PTAR es limitado, y toma decisiones desarticuladas, esto provoca que la PTAR no cumpla con su papel en la mitigación de la contaminación.</p>
Respuestas			
<p>Respuesta 3 → FM6 Contar con herramientas de apoyo para la toma de decisiones. Desarrollar modelos, análisis estadísticos, geoespaciales, costo-beneficio. Junto con prácticas integradoras entre los tomadores de decisiones.</p>	<p>Respuesta 6 → P3 Llevar a cabo investigación científica para actualizar la PTAR con una tecnología mejorada que evite que los COP lleguen al río</p>	<p>Respuesta 6 → E3 Llevar a cabo investigación científica para actualizar la PTAR con una tecnología mejorada que evite que los COP lleguen al río</p>	<p>Respuesta 12 → I5 Estimar el costo-beneficio de las decisiones potenciales o implementadas</p>