

DE LA **CIENCIA**  
A LA **ACCIÓN**  
PARA UN FUTURO  
SOSTENIBLE:

ABORDANDO EL CAMBIO CLIMÁTICO  
Y LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL  
DESDE UN ENFOQUE INTERDISCIPLINARIO



EDICIONES  
COMUNICACIÓN  
CIENTÍFICA

**Xochitl Virginia Bello Yañez**  
**Alejandra Pérez Galicia**  
(coordinadoras)



**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



Instituto Politécnico Nacional  
"La Técnica al Servicio de la Patria"



De la ciencia a la acción para un futuro  
sostenible: abordando el cambio  
climático y la contaminación ambiental  
desde un enfoque interdisciplinario

**Ediciones Comunicación Científica** se especializa en la publicación de conocimiento científico de calidad en español e inglés en soporte de libro impreso y digital en las áreas de humanidades, ciencias sociales y ciencias exactas. Guía su criterio de publicación cumpliendo con las prácticas internacionales: dictaminación de pares ciegos externos, autenticación antiplagio, comités y ética editorial, acceso abierto, métricas, campaña de promoción, distribución impresa y digital, transparencia editorial e indexación internacional.

Cada libro de la Colección Ciencia e Investigación es evaluado para su publicación mediante el sistema de dictaminación de pares externos y autenticación antiplagio. Invitamos a ver el proceso de dictaminación transparentado, así como la consulta del libro en Acceso Abierto.



[www.comunicacion-cientifica.com](http://www.comunicacion-cientifica.com)

[DOI.ORG/10.52501/cc.364](https://doi.org/10.52501/cc.364)



**COMUNICACIÓN  
CIENTÍFICA**

PUBLICACIONES  
ARBITRADAS

HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS

**CC+**

**COLECCIÓN  
CIENCIA e  
INVESTIGACIÓN**

De la ciencia a la acción para un futuro  
sostenible: abordando el cambio  
climático y la contaminación ambiental  
desde un enfoque interdisciplinario

Xochitl Virginia Bello Yañez  
Alejandra Pérez Galicia  
(coordinadoras)



**EDICIONES  
COMUNICACIÓN  
CIENTÍFICA**

De la ciencia a la acción para un futuro sostenible : abordando el cambio climático y la contaminación ambiental desde un enfoque interdisciplinario / coordinadoras Xochitl Virginia Bello Yañez, Alejandra Pérez Galicia.— Ciudad de México : Comunicación Científica, 2025 (Colección Ciencia e Investigación).

223 páginas : gráficas, fotografías ; 23 x 16.5 centímetros

DOI: 10.52501/cc.364

ISBN: 978-968-9738-44-2

1. Cambios climáticos. 2. Consumo hídrico. 3. Contaminación. 4. Consumo de agua. Desarrollo sustentable I. Bello Yañez, Xochitl Virginia, coordinadora. II. Pérez Galicia, Alejandra, coordinadora.

LC: QC981.8C5 D45

DEWEY: 551.5253 D45

La titularidad de los derechos patrimoniales y morales de esta obra pertenece a las coordinadoras D. R. © Xochitl Virginia Bello Yañez y Alejandra Pérez Galicia, 2025. Reservados todos los derechos conforme a la Ley. Su uso se rige por una licencia Creative Commons BY-NC-ND 4.0 Internacional, <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.es>

Primera edición en Ediciones Comunicación Científica, 2025

Diseño de portada: Francisco Zeledón • Interiores: Guillermo Huerta

Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., 2025,  
Av. Insurgentes Sur 1602, piso 4, suite 400,  
Crédito Constructor, Benito Juárez, 03940, Ciudad de México,  
Tel.: (52) 55-5696-6541 • Móvil: (52) 55-4516-2170  
info@comunicacion-cientifica.com • www.comunicacion-cientifica.com  
📧 comunicacioncientificapublicaciones 📧 @ ComunidadCient2

ISBN 978-968-9738-44-2

DOI 10.52501/cc.364



Esta obra fue dictaminada mediante el sistema de pares ciegos externos.  
El proceso transparentado puede consultarse, así como el libro en acceso abierto,  
en <https://doi.org/10.52501/cc.364>

# Índice

## Presentación

Fragmento de <i>La carta del gran jefe Seattle, de la tribu de los Swamish, a Franklin Pierce, presidente de los Estados Unidos de América</i> . . . . .	13
--	----

## Prólogo

<i>M. I. Xochitl Virginia Bello Yañez</i> . . . . .	15
---	----

Introducción . . . . .	17
------------------------	----

## 1. La degradación ambiental durante el Antropoceno en América y la necesidad de la acción interdisciplinaria

<i>Xochitl Virginia Bello Yañez y María Concepción Martínez Rodríguez.</i> . . . .	19
Introducción. . . . .	20
Metodología . . . . .	23
Resultados . . . . .	24
Huella ecológica . . . . .	24
Déficit/reserva ambiental . . . . .	27
Discusión . . . . .	30
Conclusiones . . . . .	34
Referencias. . . . .	36

2. Crisis hídrica en México: la alarmante caída de los acuíferos y su impacto en el futuro del agua	
<i>Arturo Torres Mendoza, Yamile Rangel Martínez, Eréndira Yaretni Mendoza Meza y Luis Alberto Quezada Téllez . . . . .</i>	41
Introducción. . . . .	42
Marco conceptual. . . . .	45
Situación hídrica en México. . . . .	48
Análisis del abatimiento de los acuíferos. . . . .	53
Desarrollo. Estudio de caso: Valle de México . . . . .	55
Acuíferos de la región hidrológica administrativa XIII. . . . .	59
Conclusiones . . . . .	60
Referencias. . . . .	61
3. Análisis del consumo hídrico en las viviendas de la región del Istmo de Tehuantepec del Corredor Interoceánico	
<i>Ruffo Cain López Hernández y Verónica Judith Yescas Martínez . . . . .</i>	65
Introducción. . . . .	66
La vivienda como unidad de consumo hídrico . . . . .	67
Vivienda y políticas públicas para el agua . . . . .	69
Metodología . . . . .	71
Resultados . . . . .	72
Contexto de la región del Istmo de Tehuantepec . . . . .	72
Contexto del estado de Oaxaca . . . . .	73
Conclusiones . . . . .	81
Referencias. . . . .	83
4. Cambio climático y transformación territorial en zona rurales de la Huasteca Hidalguense, México	
<i>Xochitl Virginia Bello Yañez y María Concepción Martínez Rodríguez. . . . .</i>	87
Introducción. . . . .	88
Materiales y metodología . . . . .	91
Zona de estudio. . . . .	91
Metodología . . . . .	93
Resultados y discusión . . . . .	95



Más es menos: el cambio climático está presente . . . . .	95
El cambio climático y las comunidades olvidadas . . . . .	97
Conclusiones . . . . .	99
Referencias. . . . .	100
5. Caracterización del sargazo, un residuo de manejo especial evaluado como sustrato para producción de biogás <i>Mariana Abigail Muñoz Díaz, Luis Raúl Tovar Gálvez y María Eugenia Gutiérrez Castillo</i> . . . . .	
Introducción. . . . .	103
Estrategias existentes de recolección, manejo y gestión del sargazo. . . . .	104
La producción de biogás a partir del RME de sargazo como una alternativa de manejo. . . . .	106
Metodología . . . . .	110
Recolección de muestras de sargazo . . . . .	111
Parámetros fisicoquímicos del sargazo . . . . .	111
Prueba de digestión anaeróbica . . . . .	112
Resultados y discusión . . . . .	112
Resultados de la caracterización fisicoquímica de los sustratos e inóculo . . . . .	115
Calidad del digestato . . . . .	121
Conclusiones . . . . .	124
Referencias. . . . .	125
6. Diagnóstico básico para la gestión de residuos sólidos urbanos: cumplimiento de normativas locales y asignación de responsabilidades <i>Juanita Rodríguez Gutiérrez, Mariana Abigail Muñoz Díaz y Juan Alberto Alcántara Cárdenas</i> . . . . .	
Introducción. . . . .	131
Metodología . . . . .	132
Área de estudio . . . . .	134
Normas NMX-00-015-1985 y NADF-AMBT-024-2013 . . .	134
Auditoría de marcas . . . . .	136

Resultados . . . . .	138
Discusión . . . . .	144
Conclusiones . . . . .	145
Anexos . . . . .	146
Referencias. . . . .	148

7. Evaluación del manejo de residuos, impacto en trabajadores de  
limpia y valorización para coprocesamiento

<i>Claudia Rodríguez Tapia, Luis Raúl Tovar Gálvez y Mariana Abigail Muñoz Díaz. . . . .</i>	149
Introducción. . . . .	150
Aproximación de la cantidad de residuos COVID-19 generados en la Ciudad de México . . . . .	152
La gestión integral de residuos en la Ciudad de México . . .	153
Materiales y métodos . . . . .	157
Seguimiento a vehículos recolectores y entrega de equipo de protección personal a cuadrillas y barrenderos en la alcaldía GAM. . . . .	157
Evaluación del poder calorífico superior e inferior de residuos COVID-19 . . . . .	158
¿Y los residuos COVID-19 que la ciudadanía genera en la CDMX en dónde están? y ¿cuál es la composición de los RSU que tira la población de la GAM?. . . . .	160
Recepción de residuos COVID-19 en las estaciones de transferencia de la CDMX. . . . .	160
Composición de los RSU generados en la alcaldía Gustavo A. Madero . . . . .	161
Resultados . . . . .	162
Seguimiento a vehículos recolectores y entrega de equipo de protección personal a cuadrillas y barrenderos en la alcaldía GAM. . . . .	162
Poder calorífico superior e inferior de residuos covid-19 . .	163
Recepción de residuos COVID-19 en las estaciones de transferencia de la CDMX. . . . .	163

Composición de los RSU generados en la alcaldía Gustavo A. Madero. . . . .	164
Discusión . . . . .	164
Conclusiones . . . . .	166
Agradecimientos . . . . .	167
Referencias. . . . .	167
 8. Disruptores endocrinos: de las aguas residuales al medioambiente y la importancia de su regulación <i>Monserrat Espinosa Bautista, María Yolanda Leonor Ordaz Guillén y Octavio Aguilar Martínez</i> . . . . .	171
Introducción. . . . .	172
La interacción no regulada de los disruptores endocrinos con el medioambiente . . . . .	174
Clasificación de sustancias como DE . . . . .	174
Contaminación por fármacos tipo DE . . . . .	175
Disruptores endócrinos presentes en aguas residuales en México . . . . .	177
Interacción no regulada de los DE en la fauna . . . . .	179
Problemas a la salud humana derivados de la interacción con disruptores endócrinos . . . . .	180
Marco normativo de los disruptores endócrinos en México . . . . .	182
Secretaría de Salud . . . . .	184
COFEPRIS. . . . .	184
SADER/SENASICA . . . . .	185
SEMARNAT. . . . .	186
Temas innovadores sobre disruptores endócrinos. . . . .	187
Conclusiones . . . . .	189
Referencias. . . . .	190
 9. Tratamiento de los Residuos Peligrosos del Sector Hidrocarburos (RPSH) en México generados en las operaciones de producción de petróleo y gas <i>Raúl Eduardo Castañeda González, Juan Alberto Alcántara Cárdenas y Jaime Alejandro Guevara Valdez</i> . . . . .	199

---

Introducción. . . . .	200
Especificaciones para el manejo de residuos generados. . . . .	201
Conclusiones . . . . .	208
Referencias. . . . .	210
Sobre los autores. . . . .	211

## Presentación

Y soy un salvaje y no comprendo como el humeante caballo de hierro pueda importar más que el búfalo al que nosotros solo matamos para poder vivir. ¿Que sería del hombre sin los animales? Si todos los animales fuesen exterminados, el hombre también perecería de una gran soledad de espíritu, pues lo que ocurra a los animales pronto habrá de ocurrirle también al hombre. Todas las cosas están relacionadas entre sí.

*Fragmento de La carta del gran jefe Seattle, de la tribu de los Swamish, a Franklin Pierce, presidente de los Estados Unidos de América.*



# Prólogo

M. I. XOCHITL VIRGINIA BELLO YAÑEZ

CIUDAD DE MÉXICO, 27 DE AGOSTO DE 2025



<https://doi.org/10.52501/cc.364.00.01>

La historia de la Tierra está marcada por transiciones profundas, registradas en estratos geológicos que revelan tanto las condiciones naturales particulares de su evolución en cada periodo como las huellas de las diversas especies que la habitan. En este registro se puede observar huellas profundas de transformaciones que han caracterizado y trazado cada época. Hoy, la humanidad se podría reconocer como fuerza geológica, teniendo así un propio periodo: el Antropoceno. Esta nueva era, aún en debate científico, pero con innegables manifestaciones, presenta evidencia del impacto humano sobre todos los ecosistemas terrestres a una escala comparable con procesos naturales que han llevado milenios.

Si comprimiéramos la edad de la Tierra (4 500 millones de años) en un solo año calendario, la especie humana habría aparecido apenas en los últimos segundos del 31 de diciembre. Sin embargo, en ese brevísimo instante hemos transformado la superficie del planeta de una forma tan acelerada y profunda que los registros de nuestras actividades quedarán impresos en rocas, agua y sedimentos durante millones de años. Esta es la paradoja del Antropoceno: el *Homo sapiens*, relativamente recién llegado (de acuerdo con la escala del tiempo geológico), ha adquirido, con su “inteligencia”, la capacidad de alterar la Tierra de manera irreversible, causando, quizá, las condiciones para su propia extinción.

La degradación ambiental contemporánea, manifestada en la pérdida de ecosistemas, la alteración de los ciclos hídricos, la creciente contamina-

ción que afecta suelos, aguas y atmósfera, y el cambio climático, no debe entenderse únicamente como una crisis inmediata, sino como un punto de inflexión en la relación de la humanidad con el planeta. La magnitud de estas transformaciones rebasa la escala del presente y se inscribe en la historia profunda de la Tierra. En este contexto, resulta imprescindible transitar a la acción, con la ciencia como base, y asumir, desde una mirada interdisciplinaria, el desafío de construir un futuro sostenible.

El libro *De la ciencia a la acción para un futuro sostenible: abordando el cambio climático y la contaminación ambiental desde un enfoque interdisciplinario* ofrece un esfuerzo colectivo por comprender y enfrentar esta situación crítica. A través de cada capítulo se recorren distintas expresiones de la crisis ambiental, desde la crisis hídrica y el agotamiento de los acuíferos hasta el impacto de los residuos sólidos y peligrosos, pasando por nuevas problemáticas como la identificación de disruptores endocrinos. Al situar estas realidades paralelamente con propuestas de innovación tecnológica, gestión y políticas públicas, la obra entrelaza el conocimiento científico con la urgencia de la acción.

Esta contribución editorial no solo documenta el deterioro ambiental contemporáneo, sino que se erige como testimonio de un momento crítico en la historia de la humanidad en sí misma. Nos recuerda que aunque el humano ha habitado solo un “segundo” en el calendario geológico de la Tierra, sus huellas perdurarán como marcas indelebles. Este libro, por tanto, es una invitación a transformar el rumbo de nuestra relación con el planeta para aminorar la profundidad de las irreversibles marcas ambientales de la humanidad en la naturaleza.



## Introducción



<https://doi.org/10.52501/cc.364.00.02>

El volumen titulado *De la ciencia a la acción para un futuro sostenible: abordando el cambio climático y la contaminación ambiental desde un enfoque interdisciplinario* constituye una contribución relevante al análisis de los principales desafíos ambientales que enfrenta la sociedad contemporánea en el marco del Antropoceno. La obra reúne un conjunto de capítulos elaborados por especialistas de diversas disciplinas, con el propósito de ofrecer una visión integral sobre los efectos del cambio climático, la contaminación y la gestión de recursos.

El libro se estructura en nueve capítulos que abordan, de manera articulada, problemáticas que van desde la degradación ambiental y la necesidad de la acción interdisciplinaria (capítulo 1), hasta el estudio de la crisis hídrica nacional y regional (capítulos 2 y 3), así como las transformaciones territoriales derivadas del cambio climático en la Huasteca hidalguense (capítulo 4). De igual forma, se examinan enfoques tecnológicos y de gestión vinculados a los residuos, tales como la valorización del sargazo para la producción de biogás (capítulo 5), el diagnóstico de la gestión de residuos sólidos urbanos (capítulo 6) y la evaluación del impacto del manejo de residuos en los trabajadores de limpieza y su potencial de valorización (capítulo 7).

La discusión se amplía hacia temas de alta relevancia ambiental y sanitaria como los disruptores endocrinos en aguas residuales y su regulación (capítulo 8), así como el tratamiento de residuos peligrosos generados por el sector hidrocarburos en México (capítulo 9). Estos estudios no solo apor-

tan evidencias científicas, sino también reflexiones críticas en torno a la necesidad de marcos regulatorios más sólidos y de políticas públicas orientadas a la sostenibilidad.

En su conjunto, esta obra busca trascender el análisis académico y científico para convertirse en una plataforma de conocimiento que incentive la toma de decisiones y la formulación de estrategias integrales. Al situar la ciencia como fundamento y la acción como objetivo principal, este libro se erige como una referencia para todos los interesados en contribuir a la construcción de un futuro sostenible.

# 1. La degradación ambiental durante el Antropoceno en América y la necesidad de la acción interdisciplinaria



XOCHITL VIRGINIA BELLO YAÑEZ\*  
MARÍA CONCEPCIÓN MARTÍNEZ RODRÍGUEZ\*\*

<https://doi.org/10.52501/cc.364.01>

## Resumen

En la presente investigación se aborda el concepto de Antropoceno a través del tiempo geológico y desde un enfoque interdisciplinario; además, se estudia mediante un análisis comparativo la huella ecológica y el déficit/reserva ambiental de 24 países del continente americano durante un lapso de 6 décadas (1961-2020), para su mejor desglose el continente se divide en tres regiones: América del Norte, América Central y el Caribe y América del Sur. El propósito de este trabajo es indagar si las actividades antropogénicas, tales como agricultura, urbanización e industrialización, han contribuido al deterioro ambiental en un periodo relativamente corto de tiempo. Los resultados encontrados son que conforme transcurren las décadas la degradación de la naturaleza en términos de huella ecológica va en detrimento, principalmente para países de la región norte, centro y Caribe, disminuyendo sus reservas naturales. La porción sur del continente cuenta con más países con biocapacidad y menor índice de impacto por parte del ser humano; asimismo, en términos continentales, Estados Unidos es la nación con la mayor huella ecológica, en contraste con Brasil que dispone del mayor número de hectáreas globales con reserva ambiental.

---

\* Doctorante en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0201-5946> ; Scopus: 59305520800 ; correo electrónico: xochbell2708@gmail.com

\*\* Doctora en Políticas Públicas. Profesora-investigadora en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>

**Palabras clave:** *recursos naturales; Antropoceno; huella ecológica; déficit/reserva ambiental.*

## Introducción

El éxito socioeconómico del *Homo sapiens* ha aumentado la esperanza de vida y mejorado la calidad de vida de la población, pero también ha aumentado la huella ecológica, lo que acelera variables centrales para el funcionamiento de la Tierra y su desequilibrio (Valladares et al., 2019).

La estratigrafía es una disciplina clave para comprender la historia de la Tierra (Miall, 2013). La edad de la Tierra (aproximadamente de 4 600 millones de años), para su mejor análisis, está dividida en unidades geocronológicas: eones, eras, periodos, épocas y edades, cada una adicionada con edades numéricas calibradas para los límites de cada unidad, y que sirven como escala de tiempo geológico a nivel internacional (Cohen et al., 2013).

Una nueva época llamada Antropoceno fue propuesta como rango de tiempo, en la que la variabilidad natural que caracterizaba al periodo Holoceno llegaba a su fin (Head et al., 2022); el Antropoceno representa la ruptura muy reciente entre la especie *Homo sapiens* y el entorno natural (Hamilton, 2016). El término Antropoceno sugiere que se haga una nueva ampliación de la columna estratigráfica, aunque no se ha llegado a un consenso científico (Rahder, 2015; Tarolli, 2016; Tempelhoff, 2021); asimismo significa un periodo de tiempo en el que los procesos geológicos superficiales están dominados por el *Homo sapiens*, relación que es estudiada por la ICS (International Chronostratigraphic Chart) para la adición a la Escala de Tiempo Geológico (Zalasiewicz et al., 2012). La condición es que la escala de perturbación ambiental registrada (producida por la industrialización global) este reflejada por indicadores estratigráficos, algunos sugieren que sea una subdivisión del Holoceno y otros que sea el término del Holoceno (Zalasiewicz et al., 2012).

Basado en la escala de tiempo geológico, nos encontramos en la era megalayan, la más reciente de las tres edades que componen el Holoceno (4 200 años hasta el periodo actual), comienza con una devastadora sequía que afectó civilizaciones en China, Egipto, India, Grecia, Mesopotamia, Siria

y Palestina, eso fue provocado probablemente por cambios en las corrientes marinas y atmosféricas, y que trajo también cambios socioculturales (Valladares et al., 2019), por lo que las variaciones en índices clave que regulan la biodiversidad podrían bien ser la formalización de una época nueva: el Antropoceno, misma que también trae transformaciones sociales, económicas, culturales y ambientales.

Desde la perspectiva de que cada periodo de tiempo se ha visto definido por la modificación de los organismos a su entorno, como la diversificación, evolución y colonización de las plantas terrestres vasculares del Devónico hasta el Pérmico que dejaron registro estratigráfico (Zalasiewicz et al., 2015), lo mismo se podría establecer para el periodo Antropoceno, ya que, sin duda, las actividades humanas dejarán huella en los estratos, desde la modificación de la superficie derivada de las construcciones de infraestructura industrial y de hábitat, hasta los vestigios de productos químicos artificiales, así como la modificación de los componentes naturales terrestres, como flora, fauna, suelo, agua y aire.

Algunos autores proponen que el inicio de esta época es en el siglo xvii con el comienzo de la Revolución Industrial europea (Crutzen, 2002; Zalasiewicz et al., 2015), acompañada con la fabricación de compuestos químicos letales no naturales, los cambios de uso de suelo, deforestación y quema de combustibles fósiles; las actividades humanas han aumentado hasta poder compararse con fuerzas geológicas importantes (Crutzen, 2006). Varios científicos afirman que debe desmitificarse la idea de que el Antropoceno es solo el resultado de la etapa industrial en Europa, sino que las actividades sociales no europeas también han contribuido en el cambio del clima (Khasnobis, 2022).

Otros autores plantean que el gasto energético del Holoceno (que abarca aproximadamente 11 700 años de 14.6 zeta Joules) ha sido superado por el consumo de energía del hombre en poco tiempo, siendo de 22 zeta Joules, mismo que ha derivado del crecimiento de la población humana y la producción industrial, estos niveles se correlacionan con 1950, por lo que argumentan que el Antropoceno comienza en el siglo xx (Syvitski et al., 2020; Zalasiewicz et al., 2015).

Certini y Scalenghe (2011) señalan que el Antropoceno comprende los últimos 2000 años, lapso en el que el creciente impacto sobre la superficie

terrestre se origina y refleja por las primeras civilizaciones. Además mencionan que se caracteriza estratigráficamente con base a los suelos alterados por el ser humano, resultado de acciones como la agricultura, urbanización e industrialización; adicionalmente cuestionan si la composición actual de la atmósfera debería de usarse como un indicador determinante para medir el impacto ambiental.

Cómo nombrar al cambio global producido por el ser humano es un debate sobre la condición humana que genera un análisis del contexto social, histórico y antropogénico correlacionado con las geociencias (Bohle y Bilham, 2019). Parte de la justificación para formalizar el Antropoceno es su duración a futuro, es probable que las construcciones humanas persistan por milenios, y si en algún momento la recuperación de la biodiversidad resultara efectiva, la flora y fauna posterior sería distinta (Zalasiewicz et al., 2012); es decir, la huella bioestratigrafía (extinción masiva de especies) sería representativa del Antropoceno.

Este periodo marca no solo el momento en el que el ser humano se expresa plenamente en la Tierra, sino en el que también se pierde la capacidad de captar la significancia de ser humano (Baldwin et al., 2019). A lo largo de mucho tiempo el entorno natural permaneció en gran parte indiferente a los afectos de la actividad humana, pero hoy es imposible que pase desapercibidas nuestras acciones (Ejsing, 2023).

El impacto que ha causado el *Homo sapiens* a la naturaleza se puede medir en términos de huella ecológica, y la autorestauración de la Tierra ante tal efecto antrópico en relación con la biocapacidad.

La huella ecológica representa el nivel de demanda del ser humano sobre la biosfera (Global Footprint Network, 2023). La biocapacidad es la facultad de la biosfera para generar recursos y retener desechos (Ahmed et al., 2022); el crecimiento de las actividades antropogénicas demanda cada vez más el uso de recursos naturales, lo que conduce a la contaminación ambiental, agotamiento de recursos, generación de desechos (agua, suelo y aire) y alteración en el uso del suelo (Ahmed y Wang, 2019), en pocas palabras, degrada la superficie terrestre.

## Metodología

Para realizar el análisis comparativo acerca de la influencia de las actividades antropogénicas en términos de huella ambiental (también llamada huella ecológica) y biocapacidad durante un determinado lapso (1961-2018) se utilizaron datos de Global Footprint Network (2023). En esta base de datos se visualiza información anual por países a nivel mundial referente a la demanda del consumo humano de recursos naturales dada en hectáreas globales (gha) y el área de terreno disponible para producir recursos naturales o absorber desechos antropogénicos, como el dióxido de carbono, este parámetro también se mide en hectáreas globales (gha). Dentro de los índices que se consideran para este estudio está la huella ecológica y el déficit o reservas en la biocapacidad de cada país (biocapacidad-huella ambiental).

La presente investigación centra su estudio en el continente americano, el cual es una región rica en recursos naturales y que desde tiempos coloniales ha suministrado inmensas cantidades de recursos a otros continentes como Europa y Asia. Inicialmente se tenía la información de 27 países de América, pero al momento de unificar los datos se eliminaron 3 naciones (Belice, Guyana Francesa y Surinam), ya que no se contaban con datos del periodo de 1961 a 1990.

Para su mejor procesamiento se englobaron los datos por décadas, abarcando 6 periodos de tiempo, asimismo, los países se agruparon por regiones, lo que resultó en tres grandes grupos: América del Norte (Canadá, Estados Unidos y México), América Central y el Caribe (Jamaica, Haití, El Salvador, Guatemala, República Dominicana, Costa Rica, Cuba, Panamá, Honduras y Nicaragua) y América del Sur (Colombia, Venezuela, Chile, Perú, Bolivia, Uruguay, Ecuador, Paraguay, Argentina, Guyana y Brasil).

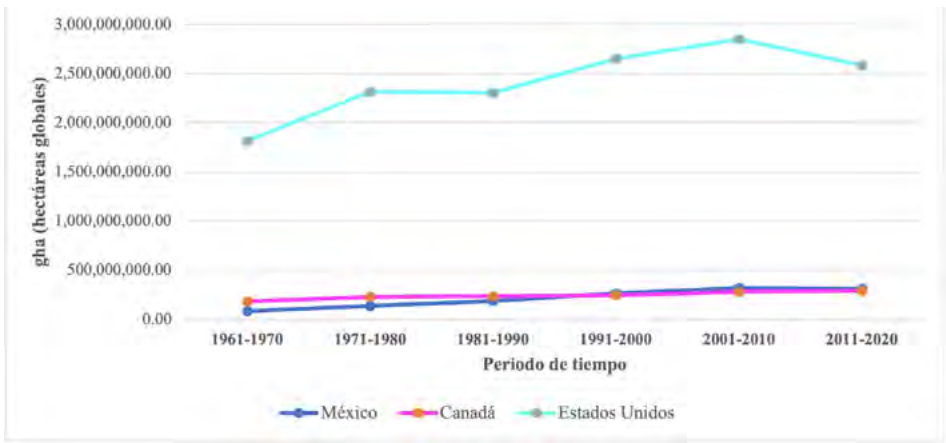
# Resultados

## Huella ecológica

A partir del análisis de la huella ambiental para cada una de las regiones en las que se centra esta investigación, se tiene que conforme pasa el tiempo la demanda de recursos naturales ha ido aumentando.

Para la región de América del Norte, el país que cuenta con mayor huella ambiental es Estados Unidos, desde 1961 hasta 2010 incrementó este índice, con una leve disminución de 2011 a 2018. La huella ecológica de México es relativamente baja en comparación con Estados Unidos, sin embargo, a través de las décadas ha ido aumentando, en 1977 supera su nivel de biocapacidad. En cuanto a Canadá, este parámetro es muy parecido al de México, aunque es importante mencionar que este país es desarrollado, lo que implicaría un mayor consumo de recursos y por ende mayor huella ecológica, pero no es así; además, cuenta con una extensa área de biocapacidad (figura 1).

Figura 1. Huella ecológica de América del Norte durante el periodo 1961-2020

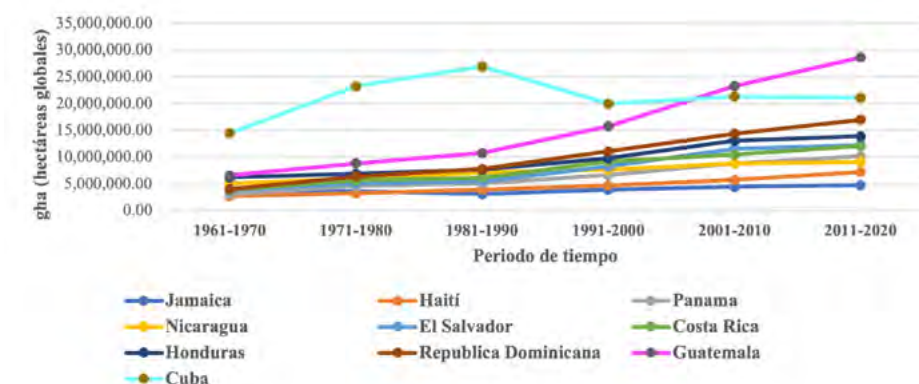


Fuente: elaboración propia a partir de datos de Global Footprint Network.



Dentro de los 10 países que comprenden América Central y el Caribe, el país con mayor huella ecológica es Cuba, con un aumento en el periodo de 1961 a 1990 y un descenso a partir de 1991, manteniéndolo hasta 2018; es seguido por Guatemala, donde en la década de 2000 a 2010 supera a Cuba y continua en aumento; y aunque el nivel de huella ecológica en Jamaica continua en aumento es la nación con menor índice de demanda de recursos naturales. Para los países restantes que conforman este bloque, el uso de recursos naturales sigue en ascenso, se posicionan de la siguiente manera (de mayor a menor consumo de recursos): Republica Dominicana, Honduras, El Salvador, Costa Rica, Panamá, Nicaragua y Haití (figura 2).

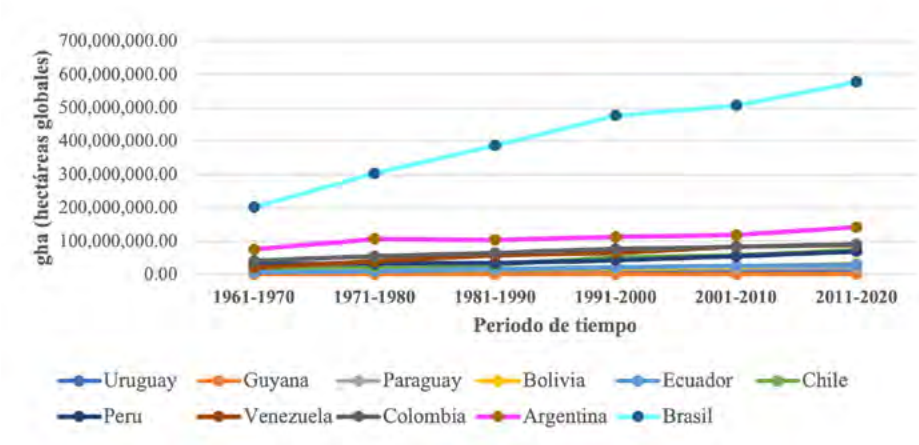
Figura 2. Huella ecológica de América Central y el Caribe durante el periodo 1961-2020



Fuente: elaboración propia a partir de datos de Global Footprint Network.

Para el grupo de países que conforman América del Sur, Brasil se posiciona con el mayor índice de huella ecológica, aunque es importante resaltar que a pesar de la gran demanda de recursos que tiene también es una de las principales naciones a nivel mundial con alto grado de biocapacidad y abundantes recursos bióticos. Para el resto de los países el nivel de huella ecológica se ha mantenido relativamente bajo a través de las décadas (1961-2018), se enlistan de la siguiente manera (de mayor a menor): Argentina, Colombia, Venezuela, Perú, Chile, Ecuador, Bolivia, Paraguay, Uruguay y Guayana (figura 3).

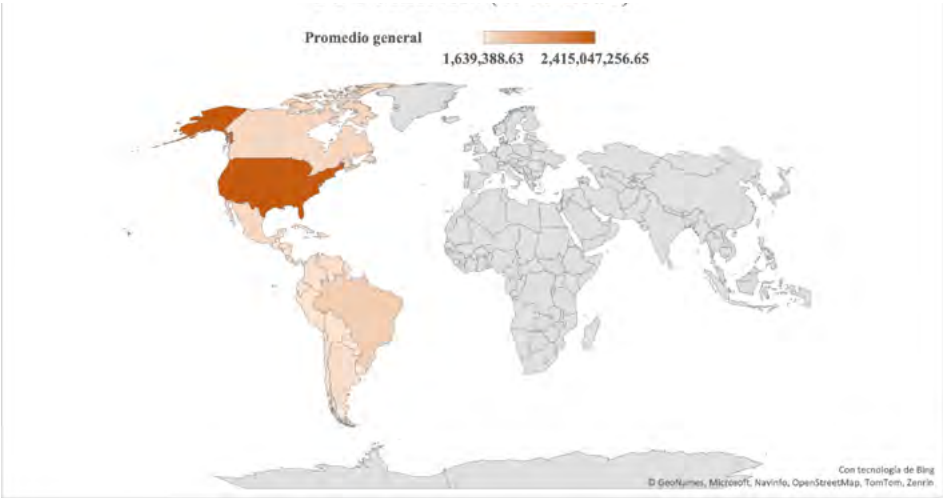
Figura 3. Huella ecológica de América del Sur durante el periodo 1961-2020



Fuente: elaboración propia a partir de datos de Global Footprint Network.

A nivel continente, el país con mayor impacto ecológico es Estados Unidos, América Central y Caribe poseen una huella ecológica media, y América del Sur cuenta con los países con menor grado de impacto antropogénico y mayores reservas ambientales (figura 4).

Figura 4. Promedio general de la huella ecológica para los 24 países de América

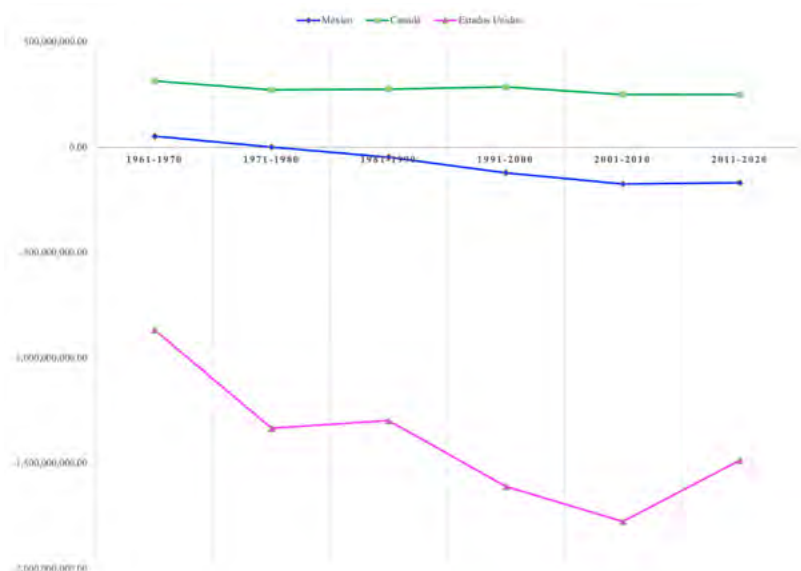


Fuente: elaboración propia a partir de datos de Global Footprint Network.

## Déficit/reserva ambiental

Para este bloque se analizó el déficit o la reserva ambiental que tiene cada país y cómo se ha ido modificados a lo largo de 6 décadas. Para la región norte, desde 1961 Estados Unidos presenta déficit ambiental; México lo comienza a presentar desde mediados de la década de 1980; y Canadá se mantiene estable con la mayor cantidad de hectáreas globales (gha) de reserva ambiental de los 3 países (figura 5).

Figura 5. Huella ecológica de América del Norte durante el periodo 1961-2020



Fuente: elaboración propia a partir de datos de Global Footprint Network.

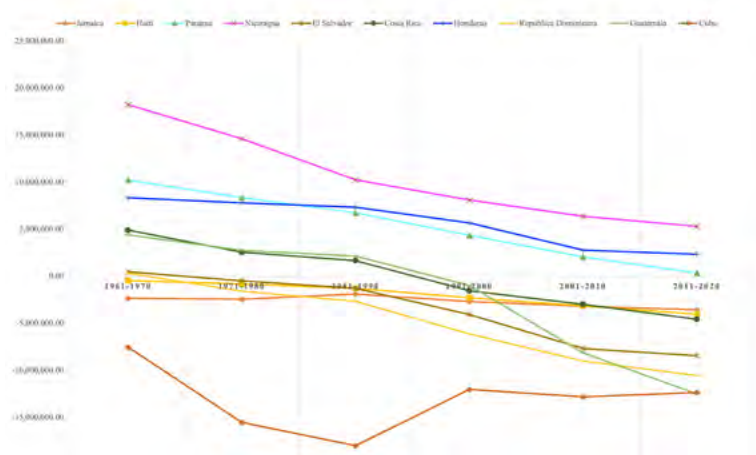
Para los países centroamericanos y caribeños solo Nicaragua, Panamá y Honduras cuentan con reserva ambiental; Costa Rica, Guatemala, El Salvador y República Dominicana pasaron de ser países con reserva a presentar déficit ambiental en la década de los noventa; mientras que Jamaica y Cuba presentaron déficit ambiental desde 1961 y hasta 2018 (figura 6).

La porción sur del continente americano es la región con más reserva ambiental. Brasil es la nación con mayores reservas en hectáreas globales; hasta el año 2000 todos los países contaban con reserva ambiental a excepción de Vene-

zuela, que en esta fecha comenzó a presentar déficit ambiental; y a partir del 2011 Chile se une al pelotón de zonas donde su huella ecológica ha superado la biocapacidad (figura 7).

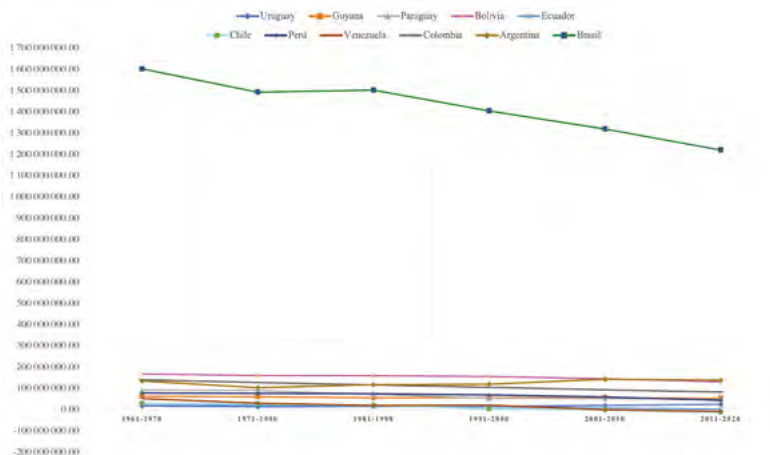
En la figura 8 se muestra cómo ha ido en decremento el número de países a nivel América que cuentan con reservas naturales. En la década de 1961-1970, el 83 % de las naciones presentaba reserva ecológica y el 17 % déficit ambiental. En el periodo 1971-1980, las reservas en América se redujeron al 75 %, contra un 25 % de países con mayor deterioro ecológico. En el lapso de 1981-1990, 71 % países se mantenían con reservas ambientales y 29 % con déficit. Durante 1991-2000, los territorios con déficit ambiental aumentaron al 38 %, mientras que el 62 % continuaron con reservas. De 2001-2010, el 42 % de tierras americanas presentó déficit, contra un 58 % con reserva ambiental. Para la última década que se analiza en esta investigación que va de 2011 a 2020, los países con reserva ambiental aún son un poco más de la mitad con 54 %, y 46 % en detrimento del entorno natural. Claramente se puede observar que conforme pasa el tiempo es mayor el territorio degradado por el *Homo sapiens*. En este intervalo de 60 años no se han implementado las medidas necesarias para recuperar el equilibrio de la biosfera, al contrario, continua la tendencia hacia la sobreexplotación de la Madre Tierra en el menor tiempo posible.

Figura 6. Huella ecológica de América Central y el Caribe durante el periodo 1961-2020



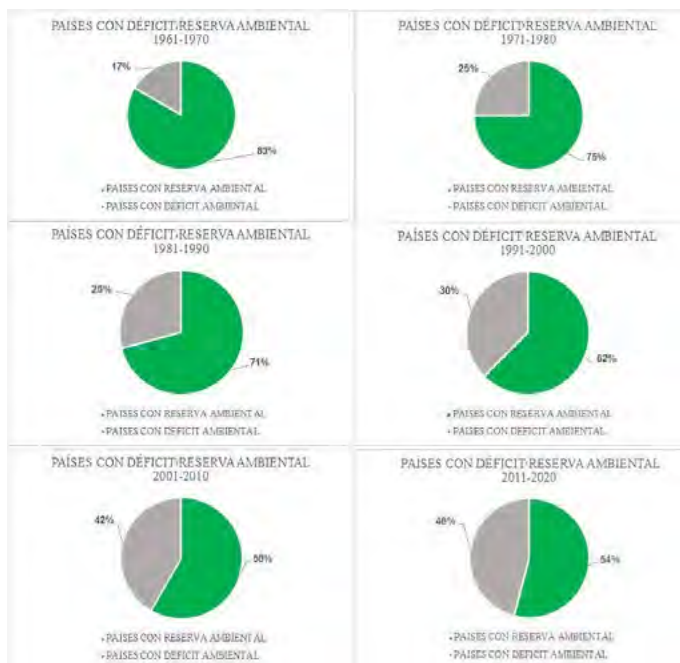
Fuente: elaboración propia a partir de datos de Global Footprint Network.

Figura 7. Huella ecológica de América del Sur durante el periodo 1961-2020



Fuente: elaboración propia a partir de datos de Global Footprint Network.

Figura 8. Comportamiento del déficit/reserva ambiental de los países por década durante el periodo 1961-2020



Fuente: elaboración propia a partir de datos de Global Footprint Network.

El mundo capitalista actual se ha enfocado hacia el crecimiento económico infinito; las economías de mercado buscan hacer más eficiente la tecnología con la finalidad de aumentar la producción y reducir costos, lo que ocasiona la disminución de la mano de obra (desempleo), que a su vez se traduce en ingresos familiares bajos y menor demanda de consumo, lo que puede terminar en recesión o depresión económica (Jackson, 2009).

El planeta Tierra pasa por una etapa de sobregiro ecológico en aras del desarrollo económico (Ahmed et al., 2022), como se muestra en las gráficas de resultados, casi la mitad de los países que integran el continente americano han sobrepasado su biocapacidad en las últimas décadas.

## Discusión

Es tal el potencial del concepto de Antropoceno que ha causado gran eco en el debate científico internacional, por su definición estratigráfica, así como su estructura del tiempo histórico; posteriormente, se adoptó en otras ciencias como en la biología, donde indaga y cuantifica el impacto humano en la naturaleza; en la parte social se orienta hacia los procesos históricos, el cambio social y las causas; y en el ámbito cultura apunta a lo individual (Toivanen et al., 2017). Al tener distintas interpretaciones al término se da la multiplicidad conceptual, que puede ser fuente de fricción y confusión, sin embargo, al mismo tiempo presenta la oportunidad para que trascienda al análisis transdisciplinario e interdisciplinario.

El clima en la Tierra a través del tiempo geológico no ha sido del todo estable, por ejemplo, en el periodo Eoceno la temperatura media oscilaba entre los 12 °C y el de la atmósfera alcanzaban hasta 1 000 ppm (valor tres veces mayor al actual); posteriormente hacia el periodo Oligoceno el planeta se comenzó a enfriar, actualmente estamos viviendo el periodo más frío en los últimos 65 millones de años (Hrkal, 2011), por lo que es razonable que exista duda entre la comunidad científica acerca de si en verdad el cambio climático actual es resultado antropogénico.

Es importante considerar que eventos naturales, como el vulcanismo, también generan aumento atmosférico de CO<sub>2</sub>, enfriamiento, lluvia ácida, acidificación de los océanos, aumento de la radiación, alteraciones del ozo-

no y aumento-descenso del nivel del mar, lo que puede causar algunas veces eventos de extinción masiva (Ernst y Youbi, 2017) Esta correlación se ha encontrado en rocas ígneas de periodos antiguos: Fanerozoico, Proterozoico, Arcaico (Ernst et al., 2021), sin embargo, en el periodo geológico actual no son representativos estos fenómenos, en los últimos siglos las fuerzas humanas han resultado más devastadoras.

La problemática de formalizar el término Antropoceno es que estratigráficamente “se mueve flexiblemente entre la *purificación* y la *impurificación* del límite entre estratigrafía y sociedad” (Lundershausen, 2018, p. 13). El Antropoceno conlleva a una pluralidad de temporalidades superpuestas (Chakrabarty, 2021) en un periodo de tiempo geológico relativamente corto, pero humanamente largo, lo que también genera confusión al momento de abordar el estudio y plantear soluciones.

En contraste con lo anterior, los cambios en la biosfera provocados por el hombre en un rango corto de tiempo son evidentes, por ejemplo, Mainguet (1997) reporta el rápido descenso, que inició en 1960, en el Mar de Aral ubicado en Asia Central, producto de la degradación ambiental producida por el hombre, la agricultura industrial es la que ocasiona cambios en los ecosistemas en esa zona, en particular por la desviación de los canales, aumento del aporte de sedimentos en ciertas temporadas, alteración de la infiltración natural del suelo, mismo que ha provocado un cambio en amplia zona geográfica y que sin duda en un futuro se verá reflejado en los estratos que ahora se están formando; dicha alteración estratigráfica es un punto a favor de adoptar formalmente y geológicamente el término de Antropoceno.

En el estudio que realizaron Shen y Yue (2023) al analizar a los países que componen el G20, en términos de desarrollo, encontraron que en países en vías de desarrollo el aumento de la huella ecológica disminuye la biocapacidad, mientras que para países desarrollados aumentará su biocapacidad; que el crecimiento sobrecalentado puede tener un impacto ecológico irreversible; y que el progreso tecnológico puede contribuir a mejorar la biocapacidad, por lo cual, es imprescindible hacer énfasis a los modelos económicos y políticos que imperan actualmente en los 11 países de América (46 % en el periodo 2011-2020) que presentan déficit ambiental. Li et al. (2022) también encontraron que en el cinturón económico del río Yan-

gtzé en China cuando se alcanzaba cierto umbral en la huella ecológica comenzaba el desarrollo sostenible.

Hay lugares donde el impacto antropogénico tiene mayor efecto que en otros, como en las Bahamas (región del Caribe), donde se ha visto drásticamente la pérdida de biodiversidad marina, la erosión costera, la dependencia de los combustibles fósiles (por el turismo), la desaparición de los arrecifes de coral y la alta vulnerabilidad de los habitantes (Moore, 2016), por lo que existen lugares que están más amenazados por los efectos de cambio climático, normalmente países subdesarrollados, lo que impide que se dé la homogeneidad del discurso político y la legislación internacional.

Ante la inminente problemática que se presenta en el Antropoceno se debe de estudiar también desde una perspectiva histórica y filosófica, para generar conocimiento colaborativo entre las ciencias naturales y las ciencias sociales (Tempelhoff, 2021), es decir, analizar el problema desde la interdisciplina para proponer metodologías eficientes.

Desde la interdisciplina se puede abordar el Antropoceno en dos visiones. La primera consiste en una reconceptualización de la división actual de la naturaleza frente a la cultura, que reposiciona al ser humano como salvador de la Tierra y de nosotros mismos; y la segunda visión es eliminar el límite entre naturaleza y cultura (Rahder, 2015), y adoptar estrategias *ad hoc*. En el aspecto cultural el concepto de Antropoceno toma fuerza, ya que ocasiona cambios, como las migraciones humanas masivas debido al cambio climático, mejor denominados “refugiados climáticos” (Baldwin et al., 2019), mismas que ocasiona conflictos sociales por choques culturales.

La legislación actual internacional no aborda eficientemente la crisis ecológica del Antropoceno, se deben endurecer las leyes regulatorias mediante el derecho ambiental (conjunto de normas destinadas a proteger el medioambiente mundial), que resultan en una Ley General del Sistema Terrestre (Kotzé, 2019) que tenga como objetivo principal la restauración del equilibrio natural, lo que conlleva a su vez la subsistencia del ser humano.

Actualmente, los grupos de investigación que estudian la problemática del Antropoceno son equipos interdisciplinarios, la mayor parte de los artículos publicados acerca de este tema tienen autores de diversas disciplinas, aunque la mayoría de la investigación es realiza por autores establecidos en países del norte global versus el sur global (Hazlett et al., 2020), los progra-



mas de conservación que arrojen estos grupos interdisciplinarios podrían tener más éxito, ya que su visión es integral y sistémica.

El Antropoceno se puede vislumbrar como un problema filosófico y también como un problema derivado de la política moderna (Baldwin et al., 2019); desde cosmovisiones como el budismo o el cristianismo, también se retoma el problema surgido en este periodo (Tola y Restrepo, 2021), por lo cual desde la teología también se podría aportar conocimiento, los líderes de grupos religiosos se replantearían el lugar del hombre en la naturaleza (Conradie, 2022) para ampliar la educación ambiental mediante su discurso, argumentando que el ser humano deje de ser el centro del sistema y se transforma la concepción a que el ser humano es parte del sistema.

Aunque el concepto de Antropoceno ya es retomado universalmente (pero informalmente) por varias disciplinas, aún no se ha evaluado como consecuencia de las relaciones de poder existente entre la especie humana, en las que las estructuras político-económicas han impedido la gobernanza ambiental, por lo que campos como las relaciones internacionales podrían contribuir al contextualizar el problema de manera regional, para ayudar a construir el puente entre la acción mundial y la capacidad local (Simangan, 2020). Asimismo, socialmente toman poder, dentro del moderno debate del Antropoceno, estilos de pensamiento como el ecomodernismo y feminismo (Hafner, 2022), movimientos que podrían resonar fuertemente en pro del medioambiente.

De acuerdo con Ahmed et al. (2022), en Brasil, uno de los países más ricos en cuanto a recursos naturales y representa el 14 % de la biocapacidad total mundial, la causa de la reducción de su biocapacidad ha sido el crecimiento económico, la industrialización y la urbanización; aunque en sus hallazgos se revela que el crecimiento económico reduce la biocapacidad, pero después de alcanzar un nivel de umbral se promueve la capacidad; lo que podría deducirse a que el aumento económico y el mejoramiento tecnológico podrían abonar a la regeneración y uso eficiente de recursos naturales, lo que reduce la huella ecológica. La brecha en el retraso científico entre países desarrollados y subdesarrollados podría ser un problema para abordar integral e internacionalmente el impacto de la huella ecológica (Hafner, 2022).

El término Capitaloceno (acuñado recientemente) podría confundirse con el de Antropoceno, sin embargo, tienen ópticas distintas. El Capitalo-

ceno es entendido como un sistema de poder, ganancia y consumismo; considera que existía una revolución ambientalista en las civilizaciones antiguas donde ya se daban relaciones sociales, culturas y económicas importantes, a diferencia del periodo donde comienza a implementarse el modelo capitalista, mismo que desata los patrones de poder en detrimento de la Madre Tierra (Moore, 2017). Durante esta etapa no solo se da la explotación de recursos naturales, sino también de la fuerza de trabajo, mediante la apropiación de energía no remunerados de mujeres y ciertas poblaciones en aras del desarrollo del Estado-capital (Moore, 2018), lo que coadyuva a la pérdida ambiental.

Se debe dejar de concebir al Antropoceno como un punto fijo en el tiempo y abordarlo como una ventana en movimiento (Stallins, 2021), en la que aún se tiene oportunidad de mitigar el daño de la etapa “mala” (Antropoceno temprano) de este periodo y migrar hacia el Antropoceno “bueno” (Antropoceno tardío), para devolver a sí mismo y a las numerosas especies el lugar óptimo que les corresponde en la Tierra (Hamilton, 2016; Kunas, 2017).

Como menciona Latour (2014, p. 2), “nuestro desarrollo muy reciente ha modificado un estado de cosas que es mucho más antiguo que la existencia misma de la raza humana, las herramientas humanas más antiguas son comparativamente muy recientes”, frase que contempla el tiempo geológico, que a su vez proporciona la profundidad del impacto antropogénico a la modificación del entorno natural; y considera que un gran impacto ecológico en un tiempo geológico relativamente corto traería consigo un sistema económico insostenible (Valladares et al., 2019), asimismo, “hay que liberarse de las ilusiones de crecimiento o progreso infinitos que provocaron este desastre” (Latour, 2017, p. 285), para proceder a la restauración de los ecosistemas mediante la aplicación de soluciones establecidas desde la interdisciplina.

## Conclusiones

Ya que el Antropoceno plantea la relación entre los seres humanos y la naturaleza, y las actividades sociales, económicas y tecnológicas se han

convertido en una fuerza geológica, la necesidad de que se le dé un tratamiento sistémico al problema está presente que incluya a las ciencias sociales para resolver la alteración documentada por las ciencias naturales, para generar conocimiento que resuene entre la población mundial y se vea reflejado en la restauración de ecosistemas.

A pesar de la evidencia, se sigue negando el impacto ambiental producido por el *Homo sapiens*. En las grandes corporaciones, industrias y en la sociedad se continua con el paradigma de que lo ideal es el crecimiento económico ilimitado, contrastando con las pruebas tangibles científicas de que de los límites planetarios existen y la superación de estos límites trae consigo consecuencias negativas a la población humana en todos los ámbitos.

Latour (2014, p. 15) argumenta que “si los diversos hilos de la geohistoria pudieran aliarse con nuevas fuentes de actividad y dinamismo, estaríamos libre de la antigua distinción modernista entre naturaleza y sociedad”, es decir, conjuntar los saberes antiguos con los modernos y reestablecer la conexión *Homo sapiens*-planeta Tierra, recordando que la Tierra puede ser sin el ser humano, pero el ser humano no puede sin las condiciones que le permitieron evolucionar y sobrevivir (o por lo menos no actualmente).

Actualmente, importantes corporaciones han dado prioridad a construir ciudades en otros planetas, como Marte, como forma de escape del desequilibrio ambiental que se ha causado a la Tierra, sin embargo, esto solo ocasiona que se comentan las mismas equivocaciones. Es imprescindible que se trabaje a la menor brevedad sobre la educación ambiental, que una buena parte del presupuesto mundial invertido para el desarrollo socio-económico se destine a la restauración de los ecosistemas, que permita nuevamente una biosfera rica y diversa.

Urge implementar políticas relevantes para disminuir la huella ecológica y aumentar la biocapacidad; analizar la capacidad de cada región y tejer una cooperación internacional en términos políticos, con la colaboración de grupos interdisciplinarios que conjunten sus diversos puntos de vista; formular un concepto globalizado del Antropoceno, y enfocado a dar paso al Antropoceno “bueno”, en el que se vuelve a la regeneración de la Tierra y en la que el *Homo sapiens* vuelve a convivir en armonía en la naturaleza.

## Referencias

- Ahmed, Z. y Wang, Z. (2019). Investigating the impact of human capital on the ecological footprint in India: An empirical analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 26782-26796. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05911-7>
- Ahmed, Z., Le, H. P. y Shahzad, S. J. H. (2022). Toward environmental sustainability: how do urbanization, economic growth, and industrialization affect biocapacity in Brazil? *Environment, Development and Sustainability*, 24(10), 11676-11696. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01915-x>
- Baldwin, A., Fröhlich, C. y Rothe, D. (2019). From climate migration to anthropocene mobilities: shifting the debate. *Mobilities*, 14(3), 289-297. <https://doi.org/10.1080/17450101.2019.1620510>
- Berkhout, F. (2014). Anthropocene futures. *Anthropocene Review*, 1(2), 154-159. <https://doi.org/10.1177/2053019614531217>
- Bohle, M. y Bilham, N. (2019). The 'anthropocene proposal': A possible quandary and a work-around. *Quaternary*, 2(2). <https://doi.org/10.3390/quat2020019>
- Certini, G. y Scalenghe, R. (2011). Anthropogenic soils are the golden spikes for the Anthropocene. *Holocene*, 21(8), 1269-1274. <https://doi.org/10.1177/0959683611408454>
- Chakrabarty, D. (2021). The chronopolitics of the Anthropocene: The pandemic and our sense of time. *Contributions to Indian Sociology*, 55(3), 324-348. <https://doi.org/10.1177/00699667211065081>
- Cohen, K. M., Finney, S. C., Gibbard, P. L. y Fan, J.-X. (2013). The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, 36(3), 199-204. <http://www.stratigraphy.org>
- Conradie, E. (2022). Some Theological Reflections Regarding Multi-disciplinary Discourse on the "Anthropocene". *Scriptura: Journal for Biblical, theological and Contextual Hermeneutics*, 121(1). <https://doi.org/10.7833/121-1-2076>
- Crutzen, P. J. (2002). Geology of mankind. *Nature*, 415(23). <https://doi.org/10.1038/415023a>
- Crutzen, P. J. (2006). The "Anthropocene". En E. Ehlers y T. Krafft (Eds.), *Earth System Science in the Anthropocene* (pp. 13-18). Springer. [https://doi.org/10.1007/3-540-26590-2\\_3](https://doi.org/10.1007/3-540-26590-2_3)
- Ejsing, M. (2023). The arrival of the Anthropocene in social theory from Modernism and Marxism towards a New Materialism. *The Sociological Review*, 71(1), 243-260.
- Ernst, R. E. y Youbi, N. (2017). How Large Igneous Provinces affect global climate, sometimes cause mass extinctions, and represent natural markers in the geological record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 478, 30-52. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.03.014>
- Ernst, R. E., Bond, D. P. G., Zhang, S. H., Buchan, K. L., Grasby, S. E., Youbi, N., Bilali, H. El, Bekker, A. y Doucet, L. S. (2021). Large Igneous Province Record Through Time and Implications for Secular Environmental Changes and Geological Time-Scale Boundaries. En R. E. Ernst, A. J. Dickson y L. S. Doucet (Eds.), *Large Igneous Provinces: A*

- Driver of Global Environmental and Biotic Changes* (pp. 1-26). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119507444.ch1>
- Global Footprint Network. (2023). *Global Footprint Network*.
- Hafner, R. (2022). The Anthropocene: Thought styles, controversies and their expansions. A review. *Die Erde Journal of the Geographical society of Berlin*, 153(3), 149-161. <https://doi.org/10.12854/erde-2022-619>
- Hamilton, C. (2016). The anthropocene as rupture. *Anthropocene Review*, 3(2), 93-106. <https://doi.org/10.1177/2053019616634741>
- Hazlett, M. A., Henderson, K. M., Zeitzer, I. F. y Drew, J. A. (2020). The geography of publishing in the Anthropocene. *Conservation Science and Practice*, 2(10). <https://doi.org/10.1111/csp2.270>
- Head, M. J., Zalasiewicz, J. A., Waters, C. N., Turner, S. D., Williams, M., Barnosky, A. D., Steffen, W., Wagreich, M., Haff, P. K., Syvitski, J., Leinfelder, R., Mccarthy, F. M. G., Rose, N. L., Wing, S. L., An, Z., Cearreta, A., Cundy, A. B., Fairchild, I. J., Han, Y. y Summerhayes, C. P. (2022). The proposed Anthropocene Epoch/Series is underpinned by an extensive array of mid-20th century stratigraphic event signals. *Journal of Quaternary Science*, 37(7), 1181-1187. <https://doi.org/10.1002/jqs.3467>
- Hrkal, Z. (2011). Climate Change and Water Resources – Challenge of Our Civilisation. En A. Baba, G. Tayfur, O. Gündüz, K. Howard, M. Friedel y A. Chambel (eds), *Climate Change and its Effects on Water Resources. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, Vol. 3. (pp. 35-41). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1143-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1143-3_5)
- Jackson, T. (2009). *Prosperity without growth? The transition to a sustainable economy*. Sustainable Development Commission. <https://www.researchgate.net/publication/271506583>
- Khasnabis, B. (2022). Politicizing Anthropocene Poetry: Reading Provincialization of Anthropocene and Planetary Shift in Climate through a Comparative Analysis of Anthropocene Blues by John Lane and Anthropocene by Sudeep Sen. *Comparative Literature: East and West*, 6(2), 194-206. <https://doi.org/10.1080/25723618.2022.2148444>
- Kotzé, L. J. (2019). Earth system law for the anthropocene. *Sustainability*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/su11236796>
- Kunnas, J. (2017). Storytelling: From the early Anthropocene to the good or the bad Anthropocene. *Anthropocene Review*, 4(2), 136-150. <https://doi.org/10.1177/2053019617725538>
- Latour, B. (2014). Agency at the time of the Anthropocene. *New Literary History*, 45(1), 1-18. <https://doi.org/10.1353/nlh.2014.0003>
- Latour, B. (2017). *Facing Gaia: eight lectures on the new climatic region* (Vol. 1). Polity.
- Li, X., Xiao, L., Tian, C., Zhu, B. y Chevallier, J. (2022). Impacts of the ecological footprint on sustainable development: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131472. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131472>

- Lundershausen, J. G. (2018). Marking the boundaries of stratigraphy: Is stratigraphy able and willing to define, describe and explain the Anthropocene? *Geo: Geography and Environment*, 5(1). <https://doi.org/10.1002/geo2.55>
- Manguet, M. (1997). The Ecological Crisis of the Aral Sea \* Basin in the Frame of a New Time Scale: The "Anthropo-Geological Scale". *Naturwissenschaften*, 84, 331-339.
- Miall, A. D. (2013). Sophisticated stratigraphy. En M. E. Bickford (Ed.), *The web of geological sciences: advances, impacts, and interactions* (pp. 169-190). The Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2013.2500\(05\)](https://doi.org/10.1130/2013.2500(05))
- Moore, A. (2016). Anthropocene anthropology: Reconceptualizing contemporary global change. *Journal of the Royal Anthropological Institute*, 22(1), 27-46. <https://doi.org/10.1111/1467-9655.12332>
- Moore, J. W. (2017). The Capitalocene, Part I: on the nature and origins of our ecological crisis. *The Journal of Peasant Studies*, 44(3), 594-630. <https://doi.org/10.1080/03066150.2016.1235036>
- Moore, J. W. (2018). The Capitalocene Part II: accumulation by appropriation and the centrality of unpaid work/energy. *The Journal of Peasant Studies*, 45(2), 237-279. <https://doi.org/10.1080/03066150.2016.1272587>
- Rahder, M. (2015). Can we bridge the "Anthropocene gap"? Global Environmental Governance, Technology and Politics: The Anthropocene Gap. *Science and Public Policy*, 42(3), 431-432. <https://doi.org/10.1093/scipol/scv003>
- Randers, J., Rockström, J., Stoknes, P.-E., Goluke, U., Collste, D., Cornell, S. E. y Donges, J. (2019). Achieving the 17 Sustainable Development Goals within 9 planetary boundaries. *Global Sustainability*, 2, 1-11. <https://doi.org/10.1017/sus.2019.22>
- Shen, Y. y Yue, S. (2023). Does ecological footprint affect biocapacity? Evidence from the experiences of G20 countries. *Natural Resource Modeling*, 36(3). <https://doi.org/10.1111/nrm.12369>
- Simangan, D. (2020). Literature review Where is the Anthropocene? IR in a new geological epoch. *International Affairs*, 96(1), 211-224. <https://doi.org/10.1093/ia/iiz248>
- Stallins, J. A. (2021). The anthropocene: the one, the many, and the topological. *Annals of the American Association of Geographers*, 111(3), 638-646. <https://doi.org/10.1080/24694452.2020.1760781>
- Syvitski, J., Waters, C. N., Day, J., Milliman, J. D., Summerhayes, C., Steffen, W., Zalasiewicz, J., Cearreta, A., Gałuszka, A., Hajdas, I., Head, M. J., Leinfelder, R., McNeill, J. R., Poirier, C., Rose, N. L., Shotyk, W., Wägrich, M. y Williams, M. (2020). Extraordinary human energy consumption and resultant geological impacts beginning around 1950 CE initiated the proposed Anthropocene Epoch. *Communications Earth and Environment*, 1. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00029-y>
- Tarolli, P. (2016). Humans and the Earth's surface. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(15), 2301-2304. <https://doi.org/10.1002/esp.4059>
- Tempelhoff, J. (2021). The Anthropocene and historical consciousness. *Tydskrif vir Geesteswetenskappe*, 61(2), 429-451. <https://doi.org/10.17159/2224-7912/2021/v61n2a3>
- Toivanen, T., Lummaa, K., Majava, A., Järvensivu, P., Lähde, V., Vaden, T. y Eronen, J. T. (2017). The many Anthropocenes: A transdisciplinary challenge for the An-

- thropocene research. *Anthropocene Review*, 4(3), 183-198. <https://doi.org/10.1177/2053019617738099>
- Tola, F. y Restrepo, J. (2021). Buddhism and Amerindian philosophies in the Anthropocene. More-than-human beings in the current ecological crisis. *Boletín Americanista*, 1(82), 207-228. <https://doi.org/10.1344/BA2021.82.1011>
- Valladares, F., Magro, S. y Martín-Forés, I. (2019). Anthropocene, the challenge for Homo sapiens to set its own limits. *Geographical Research Letters*, 45(1), 33-59. <https://doi.org/10.18172/cig.3681>
- Zalasiewicz, J., Crutzen, P. J. y Steffen, W. (2012). The anthropocene. En F. M. Gradstein, J. G. Ogg, M. D. Schmitz y G. M. Ogg (Eds.), *The Geologic Time Scale* (pp. 1033-1040). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59425-9.00032-9>
- Zalasiewicz, J., Waters, C. N., Williams, M., Barnosky, A. D., Cearreta, A., Crutzen, P., Ellis, E., Ellis, M. A., Fairchild, I. J., Grinevald, J., Haff, P. K., Hajdas, I., Leinfelder, R., McNeill, J., Odada, E. O., Poirier, C., Richter, D., Steffen, W., Summerhayes, C. y Oreskes, N. (2015). When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal. *Quaternary International*, 383, 196-203. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.11.045>





## 2. Crisis hídrica en México: la alarmante caída de los acuíferos y su impacto en el futuro del agua



ARTURO TORRES MENDOZA\*

YAMILE RANGEL MARTÍNEZ\*\*

ERÉNDIRA YARETNI MENDOZA MEZA\*\*\*

LUIS ALBERTO QUEZADA TÉLLEZ\*\*\*\*

<https://doi.org/10.52501/cc.364.02>

### Resumen

En México aproximadamente el 70 % del suministro de agua proviene de los acuíferos. Una gestión eficaz de estos recursos hídricos requiere una comprensión profunda de los patrones de flujo de agua subterránea, respaldada por datos extensivos. Este estudio utiliza la base de datos de la Comisión Nacional del Agua y de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales para analizar la dinámica del agua subterránea y evaluar las implicaciones de su extracción. Los hallazgos indican que las mayores tasas de abatimiento del acuífero se concentran en el Valle de México, donde la perforación de pozos se implementó como solución temporal al problema de suministro de agua. Este cambio ha llevado a que el acuífero pase de una condición confinada a una libre en ciertas zonas, lo que ha contribuido a una significativa subsidencia de hasta 40 cm/año en algunas regiones. La situación resalta la necesidad de abordar el manejo sostenible de los acuíferos para garantizar el suministro de agua en el futuro.

---

\* Maestro en Ingeniería Industrial. Profesor de tiempo completo en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2511-2182> ; correo electrónico: atorres@uaeh.edu.mx

\*\* Doctora en Ciencias Ambientales. Profesora de tiempo completo en Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8117-3218>

\*\*\* Doctora en Ciencias Sociales. Profesora por asignatura en Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4012-9231>

\*\*\*\* Doctor en Ciencias de la Ingeniería. Profesor de tiempo completo en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9262-9951>

**Palabras clave:** *batimiento del acuífero, subsistencia, agua confinada, agua libre.*

## Introducción

En México los acuíferos juegan un papel fundamental en el abastecimiento hídrico, proporcionan aproximadamente el 70 % del agua utilizada para consumo humano, así como actividades agrícolas e industriales; esta dependencia se ha intensificado debido al crecimiento poblacional y la urbanización, especialmente en regiones como el Valle de México (Hernández et al., 2019). Según la Conagua, para noviembre de 2023 se tenían 114 acuíferos clasificados como sobreexplotados de 653 acuíferos registrados, esto debido a la extracción intensiva, lo que ha resultado en la reducción de su capacidad de recarga y disponibilidad.

En consecuencia, la sobreexplotación de los acuíferos ha llevado a desafíos significativos como la subsidencia del terreno y la contaminación por actividades antropogénicas, que intensifican las desigualdades sociales. (Pastrana-Miranda y González-Caamal, 2022). El agotamiento de acuíferos y la subsidencia afectan directamente a comunidades vulnerables, limitando el acceso al agua potable y elevando los costos de reparación de infraestructura. Además, la expansión urbana en áreas de alto riesgo exacerba los problemas relacionados con el agua (Toscana y Villaseñor, 2021).

La práctica de extracción intensiva de agua subterránea no solo ha llevado a la degradación de recursos hídricos, también a la disminución de la capacidad de recarga natural; además, se observan cambios en la estructura de los acuíferos, de confinados a libres, lo que agrava la situación (Boyás et al., 2021).

La subsidencia, una consecuencia directa de la sobreexplotación, genera daños en infraestructuras y ecosistemas. En el Valle de México se han registrado tasas de hundimiento de hasta 40 cm/año, lo que impacta severamente las áreas urbanas y agrícolas (Martínez et al., 2019).

Para garantizar el suministro futuro es fundamental implementar estrategias de manejo integral que incluyan regulaciones estrictas, la promoción de la recarga artificial y una distribución equitativa del agua. Estudios

interdisciplinarios han destacado que los modelos de gestión deben adaptarse a las dinámicas geohidrológicas y sociopolíticas para evitar daños irreversibles (Hatch Kuri y Carrilo Rivera, 2021).

Algunas recomendaciones para una gestión sostenible incluyen la regulación de extracción, para implementar límites estrictos al bombeo, priorizando el uso doméstico y estratégico; la recarga artificial, que identifique y desarrolle zonas con alto potencial para la infiltración controlada de agua (Boyás et al., 2021); planeación urbana, que ponga énfasis en prohibir la urbanización en áreas susceptibles a hundimientos y promover desarrollos resilientes (Toscana y Villaseñor, 2021); y por último, aplicar reformas en políticas de agua, para adoptar estrategias integrales para mitigar la presión sobre los acuíferos y fomentar su sostenibilidad a largo plazo (Martínez et al., 2019).

La gestión hídrica requiere un enfoque holístico que combine regulación, innovación tecnológica y participación social. Abordar la sobreexplotación y la subsidencia no solo es crucial para garantizar el suministro de agua, sino también para proteger la infraestructura y mejorar la calidad de vida en comunidades afectadas.

Este estudio se centra en la sobreexplotación de los acuíferos en el Valle de México, el cual representa uno de los ejemplos más notables de manejo insostenible de recursos hídricos. Este problema tiene raíces en el crecimiento demográfico y urbano, así como en la alta dependencia del agua subterránea como fuente primaria de abastecimiento.

Al hacer una revisión de investigaciones recientes, observamos aspectos claves que determinan esta problemática: el Valle de México enfrenta tasas críticas de abatimiento de acuíferos (como hemos mencionado anteriormente), que se manifiestan en una subsidencia de hasta 40 cm por año en algunas zonas urbanas. Este fenómeno es el resultado de décadas de extracción no regulada y creciente presión sobre los recursos subterráneos, lo que ha transformado el acuífero de confinado a libre en ciertas áreas (Boyás et al., 2021).

Los hundimientos del terreno por la sobreexplotación han dañado infraestructura clave, incluidas carreteras y sistemas de alcantarillado, además de aumentar la vulnerabilidad a inundaciones. Este efecto amplifica el costo económico y social para la región metropolitana (Huizar-Álvarez et al., 2011). Estudios han señalado que las herramientas actuales de planificación y regulación de los acuíferos, como las concesiones de agua, no son efectivas para

detener la sobreexplotación. Se requiere una visión integral que considere dinámicas hidrológicas y sociales para implementar cambios en la gestión (Hernández et al., 2019). Las estrategias propuestas incluyen la regulación estricta de pozos, tecnologías avanzadas para la recarga artificial y la reducción de la dependencia del agua subterránea mediante sistemas alternativos de captación y tratamiento de agua (Martínez et al., 2019).

Cabe destacar que el pasado 25 de noviembre de 2024, el gobierno federal y los gobiernos estatales de los 32 estados del país firmaron el “Acuerdo Nacional por el Derecho Humano al Agua y la Sustentabilidad”. Este tiene como objetivo garantizar que el agua sea reconocida como un derecho humano, donde podemos destacar los siguientes puntos: (1) garantizar el derecho humano al agua en cantidad y calidad suficiente; (2) hacer eficiente el uso del agua en los procesos productivos de las actividades industriales, agrícolas y pecuarias; (3) invertir en infraestructura hídrica para mejorar el acceso y tratamiento del agua; (4) colaboración entre el sector público, privado y social para fortalecer el derecho humano al agua; (5) gestión eficaz y sustentable de las concesiones de agua; (6) impulsar la innovación tecnológica para el tratamiento, reúso y potabilización del agua; y (7) medidas de adaptación y mitigación frente a los efectos del cambio climático. Este acuerdo es parte del Plan Nacional Hídrico 2024-2030 que busca mitigar la crisis hídrica actual del país.

Por lo anterior, el objetivo principal del presente capítulo, es analizar la dinámica de los acuíferos del Valle de México, con énfasis en su abatimiento y sus repercusiones sociales, económicas y ambientales.

Para lograr este objetivo, el capítulo se articula desde un marco conceptual, donde se establece la definición de acuíferos y los patrones de flujo de agua subterránea; posteriormente se determina un panorama general de la situación hídrica en México mediante estadísticas clave sobre el uso de los acuíferos en el país, así como sus fuentes y gestión del agua, así como los principales desafíos de esta gestión y los factores que contribuyen a la crisis hídrica, como el cambio climático, el crecimiento poblacional y la falta de infraestructura adecuada.

Con esta información se hace un análisis del abatimiento de los acuíferos, mediante la utilización de bases de datos de la Comisión Nacional del Agua y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, estos determinaron las áreas críticas de abatimiento, sobresaliendo el Valle de México,

entre los factores que contribuyen al abatimiento están la sobreexplotación y la perforación de pozos.

A continuación se determinan las consecuencias de la caída de los acuíferos, entre los que sobresalen la subsistencia del suelo, el impacto en la infraestructura existente y los efectos sobre el suministro (disponibilidad) de agua para las comunidades y las ciudades.

En consecuencia, se desarrolla el estudio de caso: Valle de México. Se describen sus características como descripción geográfica y socioeconómica de la región; se describe la evolución de la perforación de pozos y el impacto de la explotación acuífera, incluida la transición de acuíferos confinados a libres.

Se enfatiza en el manejo sostenible de los acuíferos la necesidad de un manejo eficiente, al hacer propuestas estratégicas sobre las políticas y tecnologías que pueden contribuir a la protección y recuperación de los acuíferos, así como las propuestas para mejorar la gestión hídrica (manejo de los acuíferos, recarga artificial, reducción de la extracción y el monitoreo constante).

Para finalmente concluir en las implicaciones a largo plazo, para reflexionar sobre el futuro del agua en México si no se adoptan medidas inmediatas y, por supuesto, un llamado a la acción para los responsables de la toma de decisiones y a la sociedad en general a involucrarse en la solución de la crisis hídrica.

## Marco conceptual

Los acuíferos son formaciones geológicas subterráneas compuestas por rocas, arena, grava u otros materiales permeables que almacenan y permiten el movimiento del agua subterránea. Estas formaciones actúan como grandes reservorios naturales que contienen agua acumulada en sus poros o fracturas (Lesser-Carrillo et al., 2011).

Existen tres tipos de acuíferos, los cuales son (1) acuíferos libres o no confinados, donde el agua subterránea está directamente en contacto con la atmósfera a través del suelo permeable, su nivel superior se denomina nivel freático; (2) acuíferos confinados, estos están cubiertos por una capa

de material impermeable, lo que genera presión y permite que el agua suba cuando se perfora un pozo; y (3) acuíferos semiconfinados, estos presentan capas de permeabilidad variable, donde el agua puede moverse lentamente (Siles et al., 2015).

La función de los acuíferos empieza con la recarga de agua de lluvia, ríos o lagos, que se infiltra a través del suelo permeable y recargan el acuífero. Posteriormente, esta agua se almacena y queda atrapada parcialmente en los poros o espacios vacíos entre los materiales, como arena o grava, esta agua presenta un movimiento o fluente a una velocidad que depende de la permeabilidad del material y la pendiente del terreno. Por último, los acuíferos presentan una descarga, al salir naturalmente a la superficie en forma de manantiales o ser extraída a través de pozos para diversos usos (Rodríguez-Tapia et al., 2016).

Los acuíferos son una pieza clave del ciclo hidrológico debido a que actúan como reservas naturales de agua, especialmente en climas áridos o durante épocas de sequía; tienen una función de regulación de caudales, al liberar agua lentamente a ríos, lagos y océanos, lo que estabiliza sus niveles incluso en estaciones secas. Esto provoca un suministro de agua para consumo humano, agricultura e industria. En muchas regiones, más del 50 % del agua potable proviene de acuíferos. Son parte fundamental de la conexión con otros sistemas, al interactuar con ecosistemas superficiales, como humedales y ríos, manteniéndolos vivos y funcionales (Lesser-Carrillo et al., 2011). Por lo tanto, la importancia de los acuíferos radica en la sostenibilidad, como fuente esencial de agua dulce renovable, siempre que la extracción no supere la recarga natural; en la seguridad hídrica y como amortiguadores climáticos (Siles et al., 2015).

Actualmente, los acuíferos presentan tres grandes desafíos asociados: (1) la sobreexplotación por extraer más agua de la que se recarga, esto puede agotar el acuífero y causar hundimientos del terreno (subsistencia); (2) la contaminación, se ha demostrado que las actividades humanas pueden introducir contaminantes, como nitratos o metales pesados, que afectan la calidad del agua; y (3) el cambio climático produce alteraciones en los patrones de lluvia, esto puede reducir la recarga de acuíferos y aumentar la presión sobre ellos (Rodríguez-Tapia et al., 2016).

En el mundo existen diversas fuentes naturales que proporcionan agua a diferentes sectores económicos de cada nación. En América, el agua subterránea es alrededor del 40 % del agua utilizada para todos los fines, exceptuando los de la industria eléctrica. Cabe señalar que poco más del 50 % de agua potable proviene de esta fuente. El 40 % del agua es utilizada para irrigación y esta proporciona el 25 % de las necesidades de la industria. Sin embargo, el uso desmedido de este recurso se ha traducido en la falta de este, principalmente en las regiones pobres del continente.

El agua subterránea es considerada uno de los recursos más valiosos que contamos, debido a que solo seis décimas partes del uno por ciento de toda el agua de la Tierra constituye esta fuente. Por ello, cuando se excluyen los casquetes polares y los glaciares, las aguas subterráneas forman la mayor parte del agua dulce de la hidrosfera.

Es muy importante señalar que el agua que fluye de los ríos no procede directamente de la lluvia o de los glaciares, más bien proviene del gran porcentaje de infiltración hacia el agua subterránea.

Cuando en una región llueve, el agua que se distribuye a lo largo del terreno la mayor parte se evapora y la restante se infiltra. Aquella agua que se infiltra es la fuente primaria de toda el agua subterránea. Cabe señalar que el agua que se infiltra depende del tipo de tierra, del espacio y del tiempo. Adicionalmente, la inclinación del terreno, la intensidad de la precipitación y el tipo de vegetación son factores importantes en este fenómeno.

Del agua que se infiltra, una parte de ella es retenida por atracción molecular a la superficie, lo que se denomina cinturón de humedad del suelo. Por otro lado, del agua que no se retiene como humedad alcanza espacios libres del sedimento y de rocas, conocido como la zona de saturación. Por lo que el agua que se encuentra en esta zona se define como agua subterránea.

De las aguas subterráneas, al límite superior sobre esta zona se le conoce como nivel freático. Es importante conocer el nivel freático para poder pronosticar la productividad de los pozos, conocer los flujos de las corrientes y los manantiales, así como observar la dinámica de los lagos. La profundidad en los niveles freáticos puede variar dependiendo de las zonas, en un intervalo entre cero (la superficie) y varios centenares de metros en algunos lugares.

La porosidad se refiere a la capacidad que tiene un material de permitir el movimiento de agua. Hay rocas o sedimentos que pueden ser muy porosos y, por ello, no permiten la transmisión de agua. Estos poros deben ser suficientemente grandes y estar conectados para permitir el flujo de agua, por lo que la permeabilidad de un material es la capacidad de transmitir un fluido.

Aquellos materiales que no permiten u obstaculizan el movimiento del agua se denominan acuicludo. Un ejemplo muy claro de estos materiales es la arcilla. En el caso de la arena o la grava es más porosa y, por lo tanto, permite un mejor movimiento del agua. A las rocas y sedimentos permeables que transmiten el agua subterránea libremente se le denomina acuífero.

Una de las herramientas más utilizadas en la actualidad para la extracción de agua subterránea es el pozo. El objetivo del pozo es, principalmente, llevar el agua subterránea a la superficie. El nivel del agua subterránea juega un papel fundamental, debido a que en épocas de sequía el nivel freático desciende, mientras que en épocas de lluvia puede recuperar el abastecimiento, lo que influye de manera directa en el suministro del agua del pozo. Desafortunadamente, cuando extraemos demasiada agua del pozo el nivel freático también se reduce, este efecto se conoce como descenso de nivel.

Debido a una mayor extracción del agua en el pozo y un descenso considerable en el nivel freático, se forma una cónica llamada cono de depresión. Cuando la extracción se vuelve muy intensa, entonces este cono de depresión se hace muy ancho y empinado, por lo que se corre el riesgo de secar el pozo y llegar a su abatimiento.

## **Situación hídrica en México**

La creciente población en México y su capacidad económica ha llevado inevitablemente a una mayor demanda de las fuentes de abastecimiento del agua, básicamente como resultado de la necesidad de producir alimentos para abastecer a las zonas urbanas y rurales.



La producción y consumo de bienes y servicios ha generado una mayor demanda del vital líquido, también una mayor generación de aguas residuales por las actividades antropométricas, de las cuales una porción importante se vierten sin tratamiento en los cuerpos de agua superficiales, lo que genera la contaminación, degradación y pérdida de la biodiversidad. La contaminación de las aguas superficiales y de los acuíferos trae como consecuencia la reducción de la disponibilidad del líquido, por lo tanto, se requieren procesos e inversiones económicas, así como mitigar la contaminación, para su tratamiento y potabilización de las aguas residuales.

Los efectos sociales, demográficos, económicos y ambientales se agravan con el cambio climático, de acuerdo con las proyecciones podría aumentar el riesgo de inundaciones y sequías por los cambios en la intensidad y distribución geográfica de la población y de la precipitación, ante estos escenarios el manejo del agua en México representa un reto ambiental para el futuro.

Por lo anterior, es importante considerar dos fenómenos, el aumento de la población y su concentración en las zonas urbanas, y las tendencias de usos del recurso hídrico derivados del crecimiento de las actividades industriales y económicas de la población.

Con base a las proyecciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO), entre los años 2022 y 2030 la población en México incrementará en 8.13 millones de personas; además, se estima que en el 2030 el 78.3 % de la población total se asentará en localidades urbanas, se considera como localidad rural a aquella con una población menor de 2500 habitantes, mientras que una urbana se refiere a poblaciones con más de 2500 habitantes.

Para el periodo 2022–2030, más de la mitad del crecimiento poblacional total (56 %) se concentrará en las regiones hidrológicas administrativas (RHA), en la VIII Lerma-Santiago-Pacífico, XIII Aguas del Valle de México, VI Río Bravo y IV Balsas. A diferencia en las regiones, las cuatro RHA con menor crecimiento poblacional serán I Península de Baja California, VII Cuencas Centrales del Norte, III Pacífico Norte y II Noroeste, con el 16.6 % del crecimiento para dicho periodo, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. *Proyección de la población para el año 2030 (miles de habitantes)*

Número de RHA	Población rural			Población urbana			Población total		
	2022	2030	Incremento 2022-2030	2022	2030	Incremento 2022-2030	2022	2030	Incremento 2022-2030
I	466	537	72	4 498	4 975	478	4 964	5 513	549
II	491	524	33	2 603	2 833	230	3 094	3 357	263
III	1 399	1 395	- 4	3 388	3 662	274	4 787	5 057	270
IV	3 645	3 844	199	8 934	9 471	537	12 579	13 315	736
V	2 070	2 143	73	3 186	3 257	71	5 256	5 400	144
VI	883	925	42	12 440	13 443	1 002	13 323	14 368	1 045
VII	1 186	1 202	16	3 669	3 922	254	4 855	5 125	270
VIII	5 556	5 839	282	20 410	21 860	1 450	25 966	27 699	1 732
XI	2 438	2 488	50	3 175	3 475	300	5 613	5 963	350
X	4 602	4 727	125	6 502	6 880	378	11 104	11 607	503
XI	3 843	4 001	158	4 413	4 843	430	8 256	8 844	588
XII	786	830	44	4 406	5 004	598	5 192	5 834	642
XII	1 292	1 378	86	23 070	24 023	952	24 362	25 401	1 039
Total	28 658	29 834	1 176	100 694	107 647	6 954	129 352	137 481	8 129

Fuente: elaborado con base en CONAPO (2012).

El uso del agua de manera eficiente es un reto para el gobierno de México, ya que el agua se utiliza en diferentes formas en las actividades humanas para subsistir o para la producción e intercambio de bienes y servicios. El mayor consumo concesionario es el uso colectivo agrícola para fines de riego en los años 2021 y 2022; como se indica en la tabla 2 el agua proviene de las aguas superficiales y subterráneas y su volumen total se calcula en miles de hectómetros cúbicos ( $\text{hm}^3$ ). Un hectómetro cúbico es una unidad de volumen que equivale a un millón de metros cúbicos ( $1 \text{ hm}^3 = 1\,000\,000 \text{ m}^3$ ).

Tabla 2. *Usos agrupados consuntivos por fuente de agua*

Año	Uso agrupado	Fuente		Volumen total (miles de $\text{hm}^3$ )	Porcentaje de extracción
		Superficial (miles de $\text{hm}^3$ )	Subterránea (miles de $\text{hm}^3$ )		
2021	Agrícola	42.87	25.20	68.07	75.7
	Abastecimiento público	5.77	7.52	13.29	14.8
	Industria autoabastecida	2.09	2.53	4.62	5.1
	Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	3.62	0.35	3.97	4.4
	Total	54.34	35.60	89.94	100.0

Año	Uso agrupado	Fuente		Volumen total (miles de hm <sup>3</sup> )	Porcentaje de extracción
		Superficial (miles de hm <sup>3</sup> )	Subterránea (miles de hm <sup>3</sup> )		
2022	Agrícola	43.11	25.41	68.52	76.3
	Abastecimiento público	5.77	7.56	13.33	14.8
	Industria autoabastecida	1.81	2.46	4.27	4.8
	Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	3.25	0.43	3.68	4.1
	Total	53.94	35.86	89.80	100.0

Fuente: Conagua (2023b). Subdirección General de Administración del Agua.

La distribución del agua en México representó el 91.1 % para uso agrícola y abastecimiento público, fue para el año 2022 del volumen concesionado a escala nacional. En la siguiente tabla se indican los porcentajes de los usos del agua.

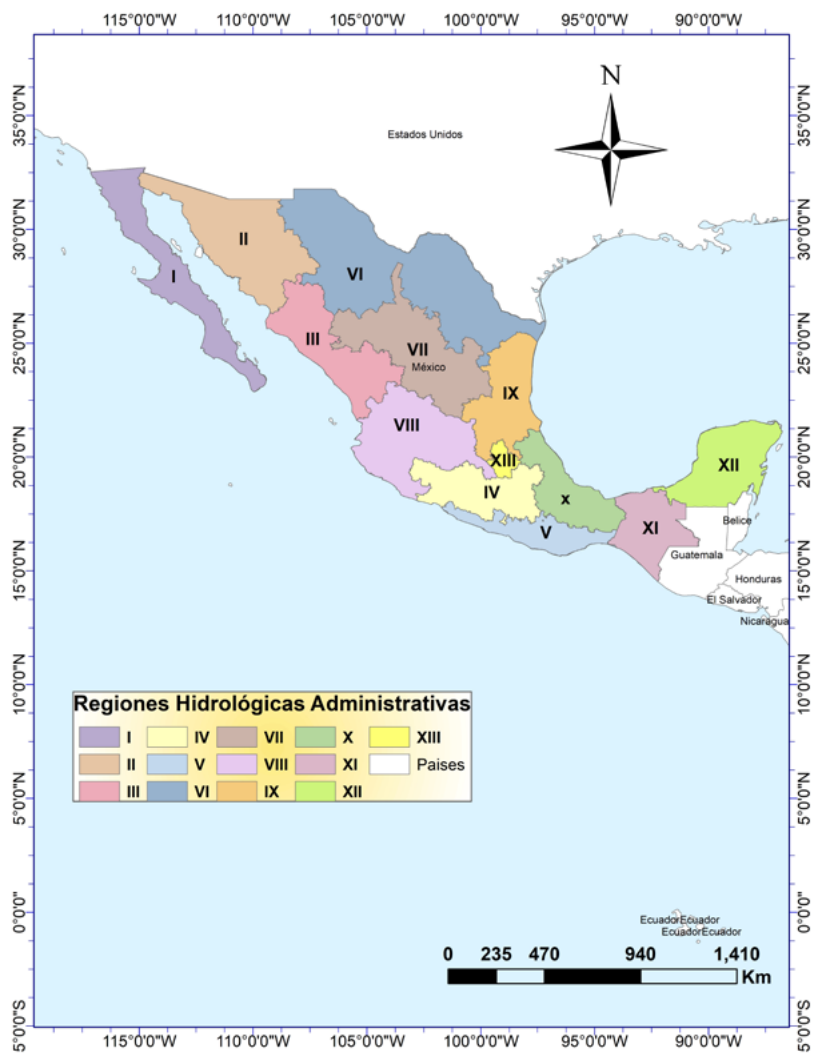
Tabla 3. *Usos agrupados del agua*

Usos	Tipos de industrias	Porcentaje	Año
Agrícola	El agua se utiliza para los sistemas de riego de la producción de cultivos.	76.3 %	2022
Abastecimiento público	Agua utilizada en los domicilios, industrias y a todas las que estén conectadas a través de las redes de agua potable.	14.8 %	
Industrias autoabastecidas	Son las utilizadas por aquellas empresas que toman el agua directamente de los cuerpos de agua .	4.8 %	
Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	Agua utilizada para la producción de electricidad.	4.1 %	

Fuente: Conagua (2023b). Subdirección General de Administración del Agua.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2023c) las regiones hidrológicas son áreas territoriales conformadas en función de sus tipologías morfológicas, orográficas e hidrológicas; la cuenca hidrológica se considera como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos. México desagrega en 757 cuencas hidrológicas, agrupadas en 37 regiones hidrológicas y segmentadas 13 regiones hidrológicas administrativas (RHA), en la figura 1 se muestra la localización de las RHA distribuidas en el territorio nacional.

Figura 1. Localización de las regiones hidrológicas administrativas



Fuente: Conagua (2023c).

En la tabla 4 se identifican las 13 regiones hidrológicas administrativas del país, con su superficie y el porcentaje que ocupa cada una de ellas.

Tabla 4. *Regiones hidrológicas administrativas*

<i>Regiones hidrológicas administrativas</i>			
<i>Clave</i>	<i>Nombre de la RHA</i>	<i>Superficie (km<sup>2</sup>)</i>	<i>Porcentaje</i>
I	Península de Baja California	154 279.000	7.87
II	Noroeste	196 326.000	10.02
III	Pacífico Norte	152 007.000	7.76
IV	Balsas	116 439.000	5.94
V	Pacífico Sur	82 775.000	4.22
VI	Río Bravo	390 440.000	19.93
VII	Cuencas Centrales del Norte	187 621.000	9.58
VIII	Lerma Santiago Pacífico	192 722.000	9.84
IX	Golfo Norte	127 064.000	6.49
X	Golfo Centro	102 354.000	5.22
XI	Frontera Sur	99 094.000	5.06
XII	Península de Yucatán	139 897.000	7.14
XIII	Aguas del Valle de México	18 229.000	0.93
Superficie Total		1 959 248.000	

Fuente: Conagua (2023a).

En lo que se refiere a la administración de las aguas subterráneas, el país está dividido en 653 acuíferos. Con el ciclo hidrológico una parte del agua regresa a la atmósfera en forma de evapotranspiración y el resto escurre por corriente y cuerpos de agua, la cual se infiltra al subsuelo como agua subterránea, de este proceso se da la recarga de los acuíferos.

## **Análisis del abatimiento de los acuíferos**

El abatimiento de los acuíferos en México es un problema significativo que afecta tanto la disponibilidad de agua como la estabilidad del suelo. Este análisis aborda el problema mediante el uso de bases de datos oficiales, la identificación de áreas críticas y la evaluación de los factores que contribuyen al fenómeno.

Para el análisis del abatimiento de los acuíferos se emplearon las bases de datos de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), el Registro Público de Derechos de Agua y el Inventario Nacional de Acuíferos para obtener información sobre el volumen de extracción, disponibilidad, y recarga de agua subterránea. Estos datos permitieron identificar acuíferos sobreex-

plotados y zonas críticas; por otro lado, también se utilizó el Monitoreo de Niveles de Agua Subterránea, que proporcionó datos históricos sobre el descenso del nivel freático en pozos estratégicos en todo el país.

También se utilizaron las bases de datos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), que aportó información sobre impactos ambientales asociados al abatimiento, como subsidencia del terreno y pérdida de humedales. Asimismo, se consultaron reportes de impacto ambiental y estudios regionales sobre la calidad del agua subterránea.

El análisis combinó estos datos mediante herramientas de sistemas de información geográfica (SIG) para mapear tendencias de abatimiento, con énfasis en el descenso del nivel freático y las tasas de extracción.

Se detectaron tres áreas críticas de abatimiento:

1. Valle de México: la zona registra el mayor abatimiento del país, con descensos de hasta 1.5 metros anuales en el nivel freático. La extracción masiva para abastecer a la Ciudad de México es la principal causa, lo que contribuye también a la subsidencia del suelo, que alcanza tasas de hasta 285 mm/año en algunas áreas (Siles et al., 2015).
2. Aguascalientes y León: estas ciudades presentan niveles de extracción que superan la recarga natural, que generan daños en la infraestructura debido a fracturas del terreno y comprometiendo la calidad del agua (Lesser-Carrillo et al., 2011).
3. Valle del Mezquital (Hidalgo): a pesar de recibir agua residual de la Ciudad de México para riego, la infiltración insuficiente no compensa el volumen extraído, esto afecta tanto la disponibilidad de agua como su calidad (Lesser-Carrillo et al., 2011).

Se observaron diversos factores que contribuyeron al abatimiento, los cuales son los siguientes

1. Sobreexplotación en las zonas urbanas e industriales, la extracción supera hasta cuatro veces la recarga natural. La demanda de agua para consumo humano, agricultura e industria son las principales causas (Rodríguez-Tapia et al., 2016).

2. Perforación de pozos ilegales. La falta de regulación efectiva permite la proliferación de pozos clandestinos, lo que agrava la extracción no controlada de agua subterránea.
3. El cambio climático, la disminución en la precipitación y la alteración de los patrones de lluvia afectan la recarga de acuíferos, lo que incrementa la presión sobre los recursos existentes.
4. Infraestructura insuficiente, la carencia de sistemas de captación de agua pluvial y el manejo inadecuado de aguas residuales limitan la recarga artificial de los acuíferos en áreas críticas.

El abatimiento de los acuíferos en México es una crisis multifactorial que requiere estrategias integrales de manejo, que incluyen la regulación estricta de la extracción, la mejora de infraestructura para la recarga artificial y la promoción de prácticas de uso sostenible. La colaboración entre instituciones gubernamentales y comunidades locales es esencial para mitigar estos impactos a largo plazo.

## Desarrollo. Estudio de caso: Valle de México

El acuífero del Valle de México está localizado en los estados de Hidalgo, Estado de México, Tlaxcala y todo el territorio de la Ciudad de México, su sede administrativa del acuífero es la Ciudad de México, este acuífero aglomera 121 municipios, (localizada en la Región Hidrológica Administrativa y con una superficie de 18,228 km<sup>2</sup> (Conagua, 2018). En la tabla 5 se muestra la distribución de la población y proyección al 2050, superficie y municipios de la RHA XIII.

Tabla 5. Distribución poblacional y proyección al 2050, superficie y municipios de la RHA XIII

Subregión/entidad federativa	Población 2020			Población al 2050 total (hab)	Superficie km <sup>2</sup>	No. de Municipios
	Rural (hab)	Urbana (hab)	Total (hab)			
Ciudad de México	64 312	9 145 632	9 209 944	8 264 501	148.65	16
Hidalgo	558 191	1 340 919	1 899 110	1 057 896	62.92	39
Estado de México	622 397	11 864 845	12 487 242	15 468 551	50 836	62
Tlaxcala	16 684	68 817	85 501	116 091	48.41	4
Valle de México	674 635	21 677 486	22 352 121	SD	SD	SD

<i>Subregión/entidad federativa</i>	<i>Población 2020</i>			<i>Población al 2050 total (hab)</i>	<i>Superficie km<sup>2</sup></i>	<i>No. de Municipios</i>
	<i>Rural (hab)</i>	<i>Urbana (hab)</i>	<i>Total (hab)</i>			
Valle de Tula	586 949	742 727	1 329 676	1 852 261	842.65	36
Total, RHA XIII	1 261 584	22 420 213	23 681 797	26 759 300	1810.99	121

Fuente: Conagua (2023b).

Los desafíos que actualmente tiene la gestión hídrica se deben de abordar mediante la planificación sostenible, la inversión en infraestructura moderna y la implementación de políticas que prioricen la equidad y la conservación del agua. Sin un enfoque integral la crisis hídrica seguirá intensificando. Estos desafíos los podemos clasificar en tres grandes grupos:

1. Cambio climático. Altera los patrones de precipitación, lo que causa sequías prolongadas en algunas áreas y lluvias intensas en otras. Esto dificulta la gestión eficiente de los recursos hídricos, al tiempo que reduce la recarga natural de acuíferos y aumenta el estrés sobre las fuentes existentes (Lesser-Carrillo et al., 2011). Los eventos extremos, como inundaciones, pueden dañar la infraestructura hídrica y aumentar la contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Rodríguez-Tapia et al., 2016).
2. Crecimiento poblacional. El aumento de la población ejerce una presión creciente sobre los recursos hídricos, tanto en cantidad como en calidad. Esto incrementa la demanda para usos domésticos, agrícolas e industriales, lo que lleva a la sobreexplotación de fuentes de agua, como acuíferos y ríos (Siles et al., 2015). En zonas urbanas, la falta de planificación en el crecimiento puede saturar las infraestructuras existentes, por lo que los sistemas de distribución son ineficientes o insuficientes para satisfacer las necesidades básicas.
3. Falta de infraestructura adecuada. Muchas regiones carecen de infraestructura para almacenar, distribuir y tratar el agua de manera eficiente. Esto incluye la ausencia de sistemas de captación, plantas de tratamiento y redes de distribución modernas, lo que contribuye a pérdidas por fugas y contaminación (Siles et al., 2015). La infraestructura obsoleta también limita la capacidad de respuesta a eventos climáticos extremos, lo que exacerba los efectos de sequías o inundaciones.



La caída de los niveles de los acuíferos en México tiene implicaciones graves en aspectos físicos, sociales y económicos. La extracción excesiva de agua subterránea ha provocado el colapso de sedimentos no consolidados en los acuíferos, lo que genera hundimientos o subsidencia del suelo.

En regiones como el Valle de México, las tasas de subsidencia han alcanzado hasta 40 cm/año, lo que representa una de las mayores tasas a nivel mundial. Esto ocurre principalmente en áreas con depósitos de arcilla altamente compresibles (Siles et al., 2015).

La compactación de los estratos puede ser permanente, reduce la capacidad de almacenamiento del acuífero y agrava la crisis hídrica (Lesser-Carrillo et al., 2011).

La subsidencia asociada al abatimiento de los acuíferos genera daños significativos en la infraestructura, incluyendo edificios y viviendas, el hundimiento desigual del terreno provoca grietas en cimientos y estructuras, lo que pone en riesgo la seguridad de los habitantes.

Se registran deformaciones y fisuras, lo que incrementa los costos de mantenimiento y reduce la vida útil de estas infraestructuras de carreteras y vías férreas (Siles et al., 2015).

La subsidencia afecta la pendiente de los sistemas de drenaje, como el Túnel Emisor Oriente en el Valle de México, que compromete la eficiencia en el manejo de aguas pluviales y residuales (Siles et al., 2015).

La caída de los acuíferos afecta directamente la disponibilidad y calidad del agua para comunidades y ciudades. La reducción de reservas y la extracción acelerada superan la capacidad de recarga natural, lo que reduce significativamente las reservas subterráneas de agua. En el Valle de México se extrae el 70 % del agua potable directamente de acuíferos, lo que agrava la crisis hídrica (Rodríguez-Tapia et al., 2016).

Contaminación de los acuíferos y el descenso de los niveles freáticos aumentan el riesgo de intrusión salina en acuíferos costeros y contaminación por infiltración de aguas residuales.

Las comunidades rurales y peri urbanas enfrentan un suministro insuficiente debido al agotamiento de pozos poco profundos y al encarecimiento de nuevas perforaciones (Lesser-Carrillo et al., 2011).

La caída de los acuíferos en México genera consecuencias graves, que van desde la subsidencia del suelo hasta el impacto en infraestructura crí-

tica y el acceso al agua. Estas problemáticas destacan la urgencia de implementar estrategias de manejo sostenible del agua, que incluyen regulaciones estrictas sobre la extracción, inversiones en infraestructura para recarga artificial y políticas de conservación.

La perforación de pozos en el Valle de México ha sido una respuesta directa a la escasez de agua que afecta a la región debido al crecimiento poblacional y a la urbanización descontrolada. Estudios recientes destacan el impacto acumulativo de esta sobreexplotación y evidencian que las técnicas tradicionales de extracción ya no son sostenibles.

Esta perforación de pozos ha evolucionado significativamente debido a la creciente demanda de agua y la sobreexplotación del recurso subterráneo. Hernández-Vivanco et al. (2020) analizaron la variabilidad temporal de los niveles de agua en el acuífero del valle de Tecamachalco, una región asociada al Valle de México. Encontraron un abatimiento promedio de 14 metros en dos décadas, lo que evidencia el impacto de la extracción excesiva y la falta de una gestión sostenible del agua subterránea.

Entre los impactos más significativos de la extracción intensiva de agua subterránea tenemos la subsidencia del terreno y problemas estructurales. Cigna y Tapete (2021) realizaron un estudio sobre subsidencia controlada estructuralmente en el valle de Aguascalientes, destacando patrones que también se observan en el Valle de México debido a la explotación prolongada.

Se han puesto en práctica innovaciones en técnicas de perforación y gestión, Sola et al. (2020) analizaron la dinámica de los acuíferos de densidad variable y su relación con la perforación de pozos. Este enfoque permitió identificar similitudes con procesos tectónicos y evaluar cómo la extracción de agua puede redistribuir cargas hidrostáticas, para ofrecer nuevas perspectivas en la planificación y manejo de pozos (Sola et al., 2020).

Lo anterior permite la reinyección y sostenibilidad hídrica, como ejemplo observamos que en la Cuenca Oriente Ayala et al. (2020) exploraron estrategia para la reinyección de aguas residuales en formaciones adecuadas, para mitigar los impactos ambientales y mejorar la sostenibilidad de los pozos. Este método es crucial para enfrentar la creciente demanda de agua y reducir la presión sobre los acuíferos (Ayala et al., 2020).

La innovación en la gestión de pozos, así como la implementación de técnicas de reinyección y el monitoreo de la subsidencia mediante tecnolo-

gía satelital, ofrece nuevas oportunidades para mitigar estos problemas. Esto será esencial para garantizar la seguridad hídrica en el Valle de México en el futuro.

### Acuíferos de la región hidrológica administrativa XIII

En la tabla 6 se indica la región hidrológica administrativa XIII del Valle de México, las aguas subterráneas corresponden a la disponibilidad de los acuíferos, donde se presentan las entradas (recarga) y salidas (descargas) que provocan una variación en el almacenamiento del propio acuífero. En la región hay 14 acuíferos con una recarga total de 2 289 millones de m<sup>3</sup>/año, una extracción de 2 245 millones de m<sup>3</sup>/año y con una disponibilidad de 182.00 millones de m<sup>3</sup>/año. Los 14 acuíferos están distribuidos y localizados en la Ciudad de México con las 16 delegaciones, en el estado de Hidalgo están localizados nueve acuíferos, en el estado de México se encuentran identificados tres y en Tlaxcala solamente un acuífero (Conagua, 2018).

Tabla 6. *Acuíferos de la RHA XIII Valle de México*

No.	Clave	Nombre de acuífero	Recarga (millones de m <sup>3</sup> )	Extracción (millones de m <sup>3</sup> )	Disponibilidad (millones de m <sup>3</sup> )	Área (km <sup>2</sup> )
1	9901	Zona metropolitana Cd. de México	512.80	1 020.03	0.00	2 103.7
2	1308	El Astillero	3.30	0.76	2.54	105.9
3	1309	Chapantango- Alfajayucan	136.90	9.28	14.72	894.6
4	1310	Valle del Mezquital	515.00	184.43	37.67	2 714.1
5	1311	Ajacuba	25.70	5.10	5.00	270.7
6	1312	Ixmiquilpan	150.10	8.50	17.00	885.3
7	1313	Actopan-Santiago de Anaya	208.10	61.11	56.99	1 065.1
8	1316	Tepeji del río	46.30	15.64	0.00	403.9
9	1319	Tecocomulco	27.80	2.97	24.33	476.4
10	1320	Apan	30.30	30.01	0.29	733.3
11	1506	Chalco-Amecameca	74.00	99.42	0.00	946.5
12	1507	Texcoco	145.10	245.72	0.00	933.6
13	1508	Cuautitlán-Pachuca	356.70	545.40	0.00	3 870.5
14	2902	Soltepec	57.00	17.33	23.47	819.6
Total RHA XIII			2 289.10	2 245.71	181.90	16 222.92

Fuente: Conagua (2020).

## Conclusiones

La sobreexplotación de los acuíferos en México, particularmente en el Valle de México, representa una crisis hídrica de proporciones alarmantes. El abatimiento acelerado de los niveles freáticos, producto de una extracción desmedida del agua subterránea, ha desencadenado una serie de problemas ambientales, sociales y económicos. La subsidencia del terreno, el deterioro de la infraestructura, la contaminación de las fuentes de agua y la disminución de la disponibilidad hídrica son algunas de las consecuencias más evidentes. Esta situación ha generado una competencia creciente por el acceso al agua, que afecta principalmente a las poblaciones más vulnerables. La falta de una gestión integral y sostenible de los recursos hídricos, caracterizada por la ausencia de políticas públicas efectivas y la fragmentación institucional, ha agravado la crisis.

Para revertir esta tendencia es necesario implementar un conjunto de medidas urgentes y coordinadas, tales como la regulación estricta de la extracción de agua, la promoción de prácticas agrícolas y urbanas más eficientes, la inversión en infraestructura para la captación y tratamiento de agua, y la concientización de la población sobre la importancia del cuidado del agua. Asimismo, es fundamental fortalecer la investigación científica para desarrollar nuevas tecnologías y herramientas que permitan una gestión más sostenible de los acuíferos. La crisis hídrica en México representa un desafío complejo que requiere la participación activa de todos los sectores de la sociedad, desde los gobiernos hasta los ciudadanos, con el objetivo de garantizar la seguridad hídrica para las generaciones presentes y futuras.

Si permitimos que la crisis hídrica se agudice las implicaciones a largo plazo serán catastróficas. La escasez de agua limitará el crecimiento económico, generará conflictos sociales y pondrá en riesgo la seguridad alimentaria. Para evitar este escenario es fundamental fomentar la colaboración entre los diferentes actores involucrados, desde los gobiernos hasta la sociedad civil. La innovación tecnológica, la investigación científica y la transferencia de conocimientos serán clave para desarrollar soluciones sostenibles y adaptadas a las necesidades de cada región. Asimismo, es necesario pro-

mover una cultura del agua que fomente el uso responsable y la valoración de este recurso vital.

La región hidrológica administrativa XIII aguas del Valle de México tiene una superficie de 18 228 km<sup>2</sup> y en la que habitan 23 681 797 millones de habitantes, para el año 2050 habrá una población de 26 759 300 habitantes, convirtiéndola en la región más densamente poblada del país. La densidad poblacional y la constante demanda y extracción de agua inducen a una elevada presión del recurso hídrico. El sistema hidrológico es complejo porque la RHA está integrada por 13 cuencas hidrológicas y 14 acuíferos, de los cuales cuatro están sobreexplotados y en subconjunto tres de estos se encuentran entre los 15 acuíferos con altos niveles de sobreexplotación del país como son el acuífero zona metropolitana de la Ciudad de México, acuífero Cuautitlán -Pachuca y acuífero Texcoco; así mismo, los tres acuíferos cuentan con disponibilidad de agua subterránea de cero.

Con base en lo expuesto anteriormente se concluye que la región hidrológica de aguas (RHA) XIII del Valle de México enfrenta una sobreexplotación debido a diversos fenómenos sociales, económicos e industriales en la zona. Los datos disponibles indican que esta sobreexplotación es consecuencia de las concesiones otorgadas para la perforación de pozos de agua para empresas, de las cuales muchas de ellas demandan grandes volúmenes de este recurso. A esto se suma el fenómeno de la migración de poblaciones de áreas semiurbanas y rurales hacia la ciudad, lo que contribuye al crecimiento de los centros urbanos. En este contexto, el acuífero de Cuautitlán-Pachuca se presenta como uno de los más importantes de la región RHA XIII, ya que es crucial para el suministro de agua para la Zona Metropolitana. Adicionalmente se recomienda la tecnificación de medidas de riego agrícola para mejorar la gestión de los recursos hídricos.

## Referencias

- Ayala, D., Ayala, S. y Pabón, G. (2020). Análisis y selección de un pozo reinjector en la Cuenca Oriente. *Revista Fuentes: El Reventón Energético*, 18(1), 51-59. <https://doi.org/10.18273/revfue.v18n1-2020006>
- Boyás Martínez, E., González Mora, M. F. y Paredes-Tavares, J. (2021). Determinación de sitios potenciales de recarga artificial de agua subterránea en cinco acuíferos de la

- Zona Metropolitana del Valle de México. *Cuadernos Geográficos*, 60(3). <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v60i3.16226>
- Cigna, F. y Tapete, D. (2021). Satellite InSAR survey of structurally-controlled land subsidence due to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Remote Sensing of Environment*, 254, 112254. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112254>
- Comisión Nacional del Agua [Conagua]. (2018, 4 de enero). *Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican*. DOF: 04/01/2018.
- Comisión Nacional del Agua [Conagua]. (2020, 17 de septiembre). *Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican*. DOF: 17/09/2020.
- Comisión Nacional del Agua [Conagua]. (2023a). *Estadísticas del agua en México*. Conagua.
- Comisión Nacional del Agua [Conagua]. (2023c). Subdirección General Técnica.
- Consejo Nacional de Población [CONAPO]. (2012). *Proyección de la población 2010-2050*. CONAPO. <http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Proyecciones>
- Hatch-Kuri, G., & Carrillo-Rivera, J. J. (2021). Groundwater flow systems and their importance in the assessment of transboundary groundwater: the Mexico-U.S.A. case. In M. M. Alconada-Magliano (Ed.), *Intensified land and water use. A holistic perspective of local to regional integration* (pp. 141-161). Cham: Springer.
- Hernández Juárez, R. A., Martínez Rivera, L. M., Peñuela-Arévalo, L. A. y Rivera-Reyes, S. (2019). Gestión del agua subterránea en los acuíferos de la cuenca del río Ayuquila-Armería en Jalisco y Colima, México. *Región y Sociedad*, 31. <https://doi.org/10.22198/rys2019/31/1093>
- Hernández-Vivanco, L., Villarreal-Manzo, L. A., Ramírez-Valverde, B., Ocampo-Fletes, I., Jaramillo-Villanueva, J. L., Ortiz-Espejel, B. y Tochiuitl-Tepox, A. (2020). Temporal variability of the groundwater level in the Tecamachalco Valley aquifer, Puebla, México, 1997-2016. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 12(1), 3-20. <http://dx.doi.org/10.5154/r.inagbi.2018.09.018>
- Huizar-Álvarez, R., Mitre-Salazar, L. M., Marín-Córdova, S., Trujillo-Candelaria, J. y Martínez-Reyes, J. (2011). Subsidence in Celaya, Guanajuato, Central Mexico: implications for groundwater extraction and the neotectonic regime. *Geofísica Internacional*, 50(3). <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1137554255>
- Lesser-Carrillo, L. E., Lesser-Illades, J. M., Arellano-Islas, S. y González-Posadas, D. (2011). Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28, 323-336.
- Martínez Austria, P. F., Díaz-Delgado, C. y Moeller-Chavez, G. (2019). Seguridad hídrica en México: diagnóstico general y desafíos principales. *Ingeniería del Agua*, 23(2), 107-121. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.10502>

- Pastrana-Miranda, T. y González-Caamal, M. M. (2022). Injusticia ambiental y marginación: la falta de acceso al agua en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Territorios*, (46), 1-25. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.9931>
- Rodríguez Esteves, J. M. (2020). El desafío sociohidrológico de la cuenca del río Tijuana ante el cambio climático. *Región y Sociedad*, 32. <https://doi.org/10.22198/rys2020/32/1377>
- Rodríguez-Tapia, L., Morales-Novelo, J. A., Sosa-Rodríguez, F. S., Altamirano-Cabrera, J. C. y Torres-Ayala, F. (2016). Agua virtual en un marco insumo-producto para la cuenca del Valle de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7, 51-66.
- Siles, G. Ll., Alcérreca-Huerta, J. C., López-Quiroz, P. y Carrera Hernández, J. (2015). On the potential of time series InSAR for subsidence and ground rupture evaluation: Application to Texcoco and Cuautitlan-Pachuca subbasins, northern Valley of Mexico. *Natural Hazards*, 79(2), 1091-1110. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1894-4>.
- Siles, G., López-Quiroz, P., Cerca, M. y Niemeier, W. (2015). *Soil fracturing identification in Southern Zona Metropolitana del Valle de Mexico by means of multi-pass InSAR and GPR*. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, Italia (pp. 3548-3551). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326587>
- Sola, F., Muñoz, A. e Izquierdo, Á. (2020). Acuíferos con flujo de densidad variable como análogos a los movimientos isostáticos litosféricos. *Geogaceta*, 67, 83-86.
- Toscana Aparicio, A. y Villaseñor Franco, A. (2021). Construcción social del desastre detonado por el sismo 19S en las alcaldías Tláhuac y Xochimilco, Ciudad de México. *TERRA Revista de Desarrollo Local*, (8), 474-505. <https://doi.org/10.7203/terra.8.20447>





### 3. Análisis del consumo hídrico en las viviendas de la región del Istmo de Tehuantepec del Corredor Interoceánico



RUFFO CAIN LÓPEZ HERNÁNDEZ\*  
VERÓNICA JUDITH YESCAS MARTÍNEZ\*\*

<https://doi.org/10.52501/cc.364.03>

#### Resumen

El objetivo principal de este estudio es analizar, desde una perspectiva cuantitativa, los patrones de consumo hídrico doméstico en las viviendas del Istmo de Tehuantepec utilizando datos secundarios que provienen de fuentes oficiales. La metodología se basa en un enfoque cuantitativo, se analizaron datos secundarios obtenidos de fuentes oficiales; se realizaron análisis estadísticos y generaron mapas temáticos por medio de SIG. Los resultados mostraron que el consumo promedio de agua en las viviendas de la región se centra en la columna vertebral de la zona del Corredor Interoceánico, con marcadas diferencias entre zonas rurales y urbanas. En las zonas urbanas, el 85 % de los hogares tuvo acceso a agua potable mediante redes municipales, aunque con una frecuencia irregular, mientras que en las zonas rurales el 75 % de los hogares dependió de fuentes como pozos y captación de agua de lluvia. El estudio revela que el consumo hídrico en las viviendas del Istmo de Tehuantepec está influenciado por factores socioeconómicos, geográficos e infraestructurales, y refleja desigualdades significativas en el acceso al agua.

---

\* Doctor en Ciencias en Desarrollo Regional y Tecnológico. Profesor en el Instituto Tecnológico de Oaxaca, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3125-9544> ; correo electrónico: [ruffolohe01@gmail.com](mailto:ruffolohe01@gmail.com)

\*\* Doctora en Ciencias en Desarrollo Regional y Tecnológico. Investigadora Postdoctoral en Universidad Autónoma "Benito Juárez" de Oaxaca, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1456-1656>

**Palabras clave:** *agua, vivienda, Oaxaca, México.*

## Introducción

El acceso al agua es un derecho humano fundamental (ONU, 2010), pero su gestión sostenible continúa siendo uno de los mayores desafíos contemporáneos. A nivel global, estudios como los de Gleick (1993), pionero en el análisis de la seguridad hídrica, destacan que la escasez de agua no solo es un problema físico, sino también un problema de gestión y equidad en el acceso al recurso.

En México, la gestión del agua está profundamente marcada por las disparidades regionales y la presión que genera el crecimiento demográfico. Arreguín et al. (2007) identifica que la planificación hídrica en el país ha estado limitada por políticas que no integran las necesidades locales y las “relaciones políticas, económicas, ambientales y sociales” ni consideran las variaciones climáticas (p. 130). Más recientemente, investigadores como Tortajada (2020) destacan la urgencia de integrar enfoques multidimensionales que incluyan variables sociales y económicas para gestionar la demanda de agua, especialmente en zonas estratégicas de desarrollo como el Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec (CIIT).

El estado de Oaxaca, y particularmente el Istmo de Tehuantepec (IT), constituye una región estratégica no solo por su relevancia geopolítica en el CIIT, sino también por su diversidad cultural y su situación hídrica. Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2023), el acceso al agua debe ser un derecho humano esencial, sin embargo, ocupa el lugar 21 en plantas de potabilización en la entidad, lo que marca desigualdades entre las áreas urbanas y rurales. Estudios recientes de Pérez y Fuentes (2022), y de López y Sánchez (2022) indican que el consumo hídrico en las viviendas del Istmo está influenciado por factores como los patrones de urbanización, los usos tradicionales del recurso y la infraestructura hídrica disponible. Por tanto se propone como hipótesis central que el consumo hídrico en las viviendas de la región del Istmo de Tehuantepec está influenciado por factores socioeconómicos, culturales y de acceso a infraestructura, lo que genera disparidades significativas que pueden ser identificadas y co-

rregidas mediante un análisis integral que permita optimizar las políticas públicas y mejorar la sostenibilidad en el uso del recurso en el marco del Corredor Interoceánico.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo analizar el consumo hídrico en las viviendas de la región del Istmo de Tehuantepec, en el marco del Corredor Interoceánico. La metodología se basa en un enfoque cuantitativo, analizando datos secundarios obtenidos de fuentes oficiales; se realizan análisis estadísticos y la generación de mapas temáticos por medio de Sistema de Información Geográfica (SIG). Este análisis busca no solo identificar patrones y desafíos asociados al consumo, sino también proponer estrategias que promuevan un manejo sostenible del agua, contribuyendo al bienestar de las comunidades y al éxito de los proyectos estratégicos.

### **La vivienda como unidad de consumo hídrico**

La vivienda, más allá de ser un espacio físico, es un núcleo de interacción social donde se satisfacen necesidades de seguridad, refugio y otras necesidades básicas como el acceso al agua, drenaje y energía (Soto, 2023). Según Gilbert y Gugler (1992), el diseño y la infraestructura de la vivienda condicionan directamente el uso y disponibilidad de agua, por ejemplo, en países en desarrollo la calidad de las instalaciones sanitarias y la presencia de conexiones de agua corriente son indicadores críticos de equidad social.

Por su parte, los estudios de la Organización de las Naciones Unidas (ONU-HABITAT, 2019) establecieron que una vivienda adecuada debe incluir acceso a servicios básicos, como agua potable. Este acceso no solo impacta la salud, sino también la seguridad alimentaria, la higiene y la productividad económica de los hogares.

A su vez la vivienda ha sido históricamente conceptualizada como un espacio de consumo y producción de bienes y servicios esenciales para la vida humana. Engel (1857), en su análisis sobre los patrones de gasto familiar, consideraba los ámbitos del consumo de recursos dentro de un hogar está determinado por el ingreso, pero también por la estructura de necesidades que evolucionan con el tiempo. Este principio es aplicable al consumo

hídrico, donde las características de la vivienda, como su tamaño, infraestructura y ubicación, son factores clave.

Más recientemente, Gleick (1996) ha enfatizado la importancia de garantizar un suministro mínimo de agua para satisfacer las necesidades básicas de los hogares. Según Gleick, el diseño de la vivienda y la infraestructura disponible no solo determina la cantidad de agua consumida, sino también la calidad del acceso. Esta perspectiva amplía el enfoque clásico al incorporar dimensiones ambientales y sociales a los estudios hídricos.

Sin embargo, se debe considerar que los factores que determinan el consumo hídrico en las viviendas son múltiples y están interrelacionados. Desde el punto de vista estructural, Renwick y Green (2000) consideran que el tamaño de la vivienda, la presencia de dispositivos ahorradores y la disponibilidad de fuentes alternativas de agua, como la captación pluvial, son determinantes directos del consumo.

De lo anterior se ha considerado la perspectiva social, donde la huella cultural también desempeña un papel fundamental, por ello Pérez y Fuentes (2022) destacan que los diferentes hábitos de consumo varían significativamente entre regiones debido a factores culturales, climáticos y socioeconómicos; esto es particularmente relevante en regiones como el IT, donde las prácticas tradicionales de uso del agua conviven con nuevas exigencias derivadas de la urbanización y los proyectos de desarrollo.

Otra de las dimensiones importantes a incorporar en los estudios son los estudiados por Falkenmark y Rockström (2021), quienes consideran importante la función hídrica no sólo para entender la resiliencia en los sistemas naturales y analizar el consumo directo de agua en las viviendas, sino también el impacto indirecto generado por la producción de bienes y servicios utilizados en el hogar. Este enfoque es crucial para entender cómo la vivienda contribuye al uso sostenible del agua.

Por su parte, Tortajada (2020) enfatiza la importancia de las políticas públicas para regular el consumo hídrico. De acuerdo con su análisis, se debe hacer concienciación, pues las estrategias de planificación urbana tienen el potencial de transformar los patrones de consumo, pero solo si se diseñan con un enfoque integral que considere las condiciones locales.

## Vivienda y políticas públicas para el agua

El diseño de políticas públicas es fundamental para garantizar un acceso equitativo al agua. Según Biswas (2004), los gobiernos deben priorizar inversiones en infraestructura que incluyan redes de abastecimiento y saneamiento en zonas marginadas. En este sentido, la colaboración entre sectores públicos y privados se presenta como una estrategia efectiva para mejorar la cobertura y eficiencia en el uso del agua (Rogers et al., 2002).

En México, estudios de Conagua (2024) destacan que la implementación de programas como el Programa de Agua Potable, Drenaje y Tratamiento (PROAGUA) ha mejorado significativamente el acceso al agua potable en zonas rurales, aunque persisten desafíos relacionados con el mantenimiento de infraestructura y la sostenibilidad financiera.

En este sentido la vivienda representa un espacio fundamental donde las políticas públicas relativas al agua tienen su impacto más directo. Desde una perspectiva clásica, Le Corbusier (1933), en sus reflexiones sobre el urbanismo y la vivienda, la considera como refugio, pero en mejor sentido una unidad funcional que debe responder a las necesidades básicas del ser humano, incluida la provisión de agua. Aunque este enfoque no abordaba directamente el manejo del recurso hídrico, sentó las bases para considerar la vivienda como una estructura integral vinculada a las políticas públicas.

En el ámbito contemporáneo, Biswas (2004) y Tortajada (2020) enfatizan que todos los países en desarrollo deberán poner más en práctica y los procesos de la gestión del agua, ya que es importante materializar las decisiones gubernamentales respecto al acceso, calidad y uso. Este planteamiento resalta la necesidad de integrar a la vivienda como un eje clave en los marcos regulatorios y en las estrategias de sostenibilidad.

Si bien, a lo largo de la historia, las políticas públicas en torno al agua han evolucionado en respuesta a los cambios sociales, económicos y ambientales, por ello Gleick (1996) destacó que es importante el desarrollo de las políticas y la infraestructura para abastecer el recurso hídrico y evitar la brecha social en el territorio. Este cambio incluye el reconocimiento de que la vivienda es una unidad crítica para implementar estrategias de ahorro y eficiencia.

En tanto Tortajada y Castelán (2003) especifican que entre autoridades los conflictos sociales sobresalen en torno al agua, debido a que tradicionalmente pueden afectar las infraestructuras de distribución, lo que impide que el gobierno ceda recursos financieros y mejoras en el sector hídrico. Esto ha llevado a desigualdades en el acceso y en la calidad del servicio, especialmente en regiones marginadas como el Istmo de Tehuantepec.

Entre los instrumentos de políticas públicas que afectan directamente a la vivienda, destacan los programas de subsidios, incentivos para la adopción de tecnologías ahorradoras y los esquemas tarifarios. Según Renwick y Green (2000), la aplicación de subsidios dirigidos al acceso a dispositivos ahorradores en viviendas ha demostrado ser una herramienta eficaz para reducir el consumo hídrico sin afectar el bienestar de las familias. De lo anterior a nivel nacional, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) ha impulsado programas como PROAGUA, que buscan mejorar la infraestructura hídrica en comunidades vulnerables. Sin embargo, Pérez y Fuentes (2022) advierten que los programas no siempre se diseñan considerando las características socioeconómicas y culturales de las regiones, lo que limita su efectividad.

Los desafíos en la implementación de políticas públicas hídricas relacionadas con la vivienda son significativos. Tortajada (2020) identifica tres obstáculos principales: la falta de coordinación interinstitucional, la insuficiencia de recursos financieros y la carencia de un enfoque participativo que integre a los usuarios. Estos problemas son especialmente visibles en regiones como el Istmo de Tehuantepec, donde las viviendas enfrentan condiciones de acceso desigual al agua.

En este sentido, Falkenmark y Wang-Erlandsson (2021) abogan por una gestión hídrica holística e integrada, que combina estrategias locales con enfoques globales para abordar los desafíos del cambio climático y la escasez del recurso. Según ellos, la vivienda es el punto de arranque para implementar tecnologías sostenibles y propiciar una evolución en los hábitos de consumo.

Por tanto, el IT es un caso emblemático para analizar la relación entre vivienda y políticas públicas en torno al agua. Además, Pérez y Fuentes (2022) destacan que los esfuerzos gubernamentales en esta zona no han podido cerrar la brecha en el acceso al agua gracias a la falta de un enfoque

integral que considere tanto las características de las viviendas como las dinámicas socioculturales. Esto subraya la importancia de diseñar políticas públicas que atiendan las necesidades específicas de la región.

## Metodología

La presente investigación utiliza un enfoque cuantitativo, el cual permitió medir y analizar los fenómenos sociales y territoriales mediante la recolección y análisis de datos numéricos (Sampieri et al., 2014). En cuanto a la selección de los datos, se consideraron variables clave relacionadas con los indicadores de vivienda, acceso al agua, servicios básicos y características territoriales. Estas variables se eligieron con base en estudios previos que destacan la importancia de los factores territoriales en el análisis urbano.

Previo al análisis, los datos fueron revisados y depurados para identificar valores atípicos o inconsistencias. Además, se realizó un proceso de normalización para garantizar la comparabilidad entre diferentes conjuntos de datos (Babbie, 2020). En una primera etapa, se utilizaron estadísticas descriptivas para resumir y presentar las características principales de los datos. Esto incluye el cálculo de medias, medianas y desviaciones estándar para cada variable.

Por otro lado, para el análisis espacial y la representación visual de los datos, se utilizaron herramientas de SIG, con apoyo del software QGIS, permitiendo la elaboración de mapas temáticos que destacan patrones geográficos y territoriales relevantes (Longley et al., 2015). Además de la representación visual, se realizaron análisis espaciales, como la detección de clústeres y el cálculo de índices de Moran, para evaluar la existencia de autocorrelación espacial (Anselin, 1995).

# Resultados

## Contexto de la región del Istmo de Tehuantepec

El estado de Oaxaca se ubica al sur de la República Mexicana, se le considera la entidad con el mayor número de municipios (570), los cuales concentran en mayor medida población urbana con el 59.06 % (INEGI, 2022). La entidad colinda al norte con el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave y con Puebla; al oeste con Guerrero; al sur con el océano Pacífico y al este con el estado de Chiapas (véase figura 1).

Figura 1. Ubicación geográfica del estado de Oaxaca



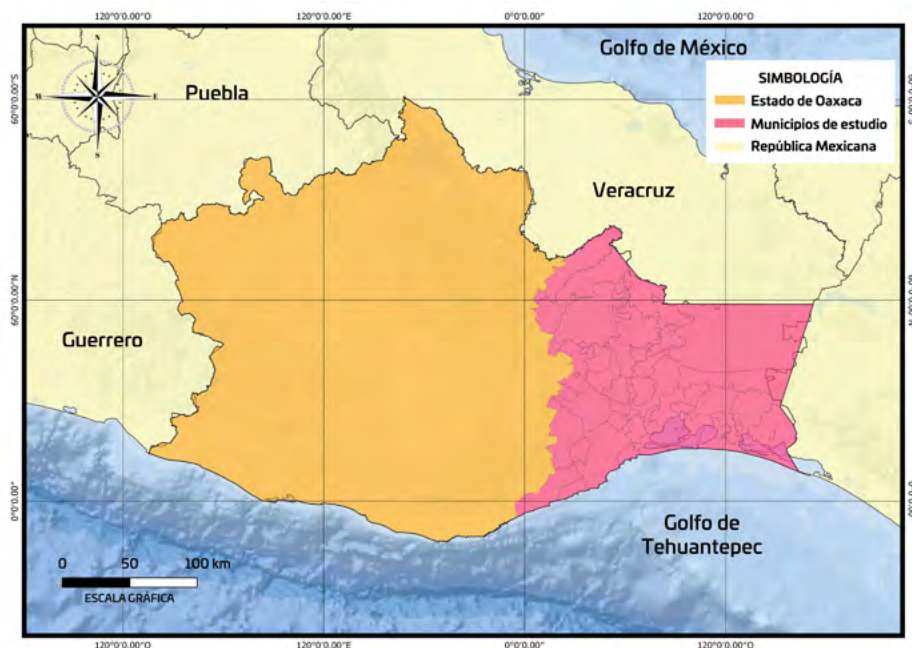
Fuente: elaboración propia con apoyo del software ArcMAP-ArcGIS Desktop 10.3, con base en datos obtenidos del marco geoestadístico nacional (INEGI, 2024).

La entidad de Oaxaca posee una regionalización económica que registra ocho regiones: Cañada, Costa, Istmo, Mixteca, Papaloapan, Sierra Norte,



Sierra Sur y Valles Centrales. A su vez, posee una diversidad de composición multicultural, donde más del 34 % de la población habla una lengua indígena; siendo las más habladas la zapoteca, mixteca, mazateco y mixe (SIASAR, 2023). Esta diversidad ha influido en la fragmentación de jurisdicciones, e incide en los cambios del ámbito económico y social (véase figura 2).

Figura 2. Ubicación geográfica del estado de Oaxaca.



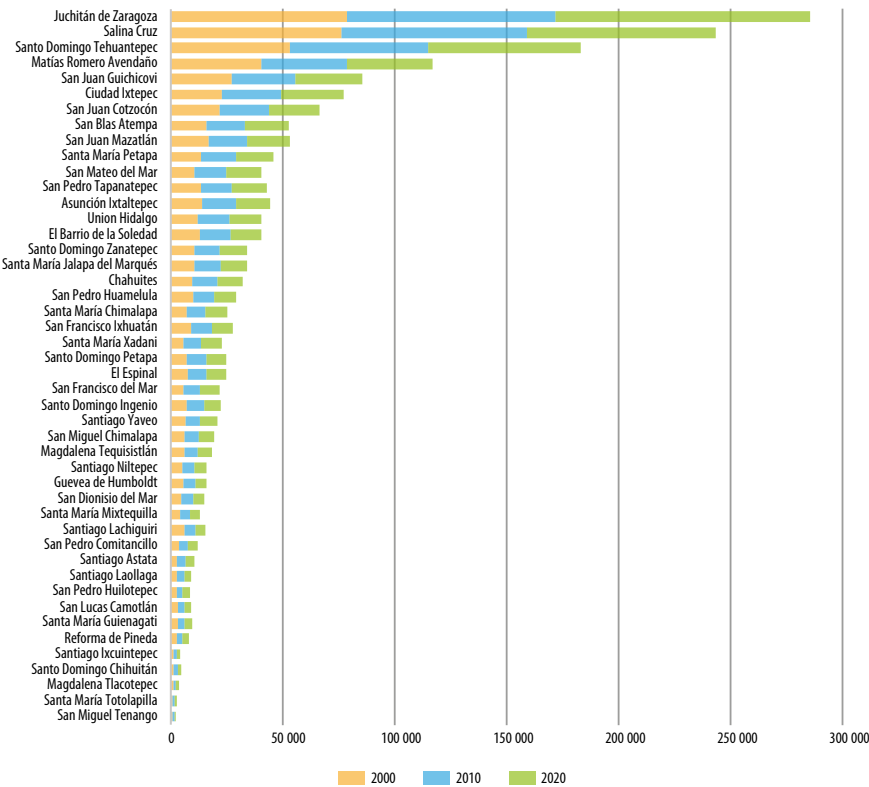
Fuente: elaboración propia con apoyo del software ArcMAP-ArcGIS Desktop 10.3, con base en datos obtenidos del marco geoestadístico nacional (INEGI, 2024).

## Contexto del estado de Oaxaca

El estado de Oaxaca presenta una urbanización marcada dentro del territorio, sin embargo, cuenta con bastos municipios que ocupan altos índices de rezago social. En este sentido, los municipios que integran el corredor interoceánico tienen una población total al año 2020 de 696 871 habitantes, lo que representaba el 16.89% de la población de la entidad.

En este sentido, la mayor población se ubicaba en el municipio de Juchitán de Zaragoza con 113 570 habitantes; seguido de Salina Cruz con 84 438 habitantes; y en tercer lugar está Santo Domingo Tehuantepec con 67 739 habitantes (todos estos durante el año 2020), estos siguen la tendencia de crecimiento desde el año 2000. No se omite mencionar que los dos últimos municipios pertenecen a la Zona Metropolitana de Tehuantepec (ZMT). Por el contrario, los municipios con menor población son Magdalena Tlacotepec con 1 297; seguido de Santa María Totolapilla, que contaba con 812 habitantes; y, finalmente, San Miguel Tenango, con 653 habitantes (véase gráfica 1) (todos estos durante el año 2020).

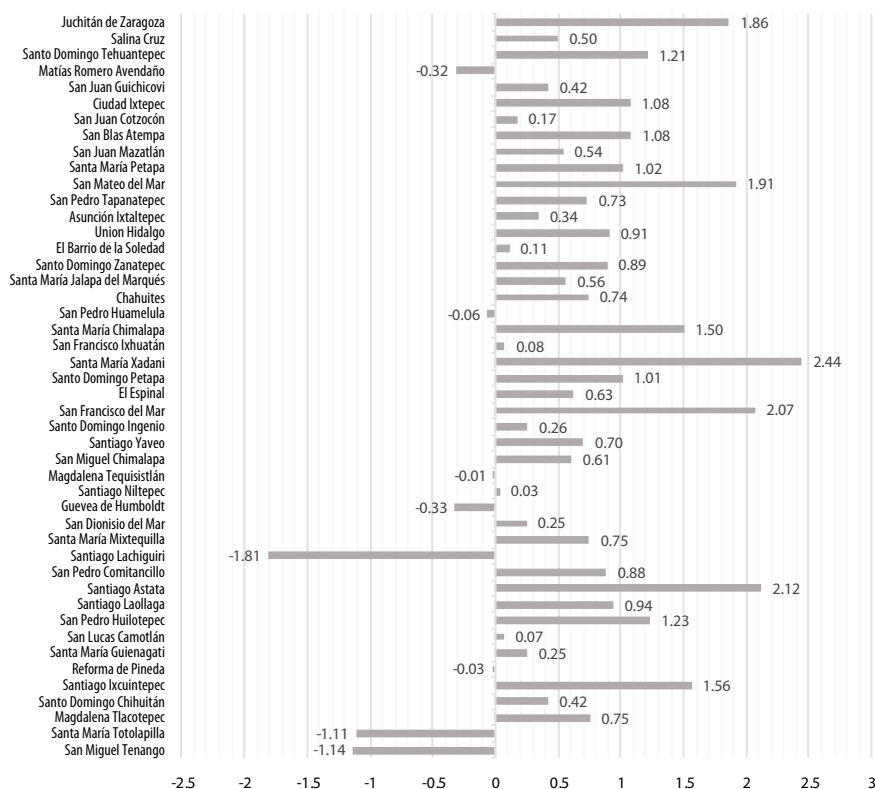
Gráfica 1. Población de los municipios del estado de Oaxaca que integran el CIIT, durante los años 2000, 2010 y 2020



Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos del XII Censo General de Población y Vivienda 2000; Censo de Población y Vivienda 2010; y Censo de Población y Vivienda 2020.

Sin embargo, este grupo poblacional ha mantenido un crecimiento continuo (mínimo) durante las últimas dos décadas (durante el periodo 2000-2020), destacando el municipio con mayor porcentaje de crecimiento en Santa María Xadani con 2.44 % de crecimiento; seguido de Santiago Astata con 2.12 %; y finalmente San Francisco del Mar con 2.07 %. Por el contrario, municipios con decrecimiento poblacional se presenta en Santa María Totolapilla con -1.11%; seguido de San Miguel Tenango con -1.14%; y, finalmente, el de mayor decrecimiento es el de Santiago Lachiguiri con -1.81 % (véase gráfica 2).

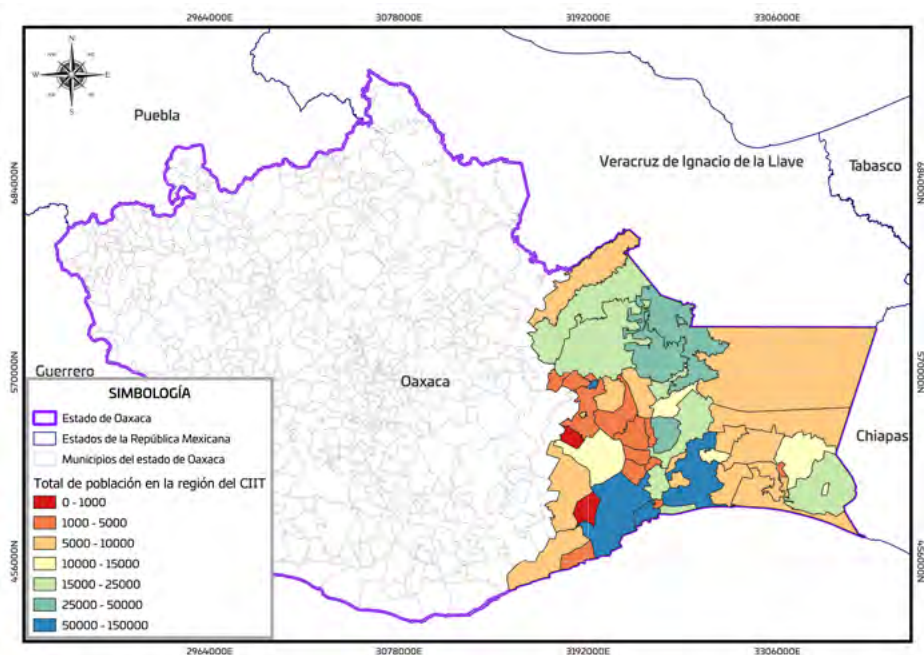
Gráfica 2. Porcentaje de crecimiento de la población de los municipios del estado de Oaxaca que integran el CIIT, durante los años 2000, 2010 y 2020



Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos del XII Censo General de Población y Vivienda 2000; Censo de Población y Vivienda 2010; y Censo de Población y Vivienda 2020.

En este sentido, se observa que la población se distribuye en mayor medida en la zona de la ZMT y en el municipio de Juchitán de Zaragoza (en la zona sur de la entidad); por otro lado, predominantemente la población se concentra en el municipio de Matías Romero Avendaño y en San Juan Guichicovi (en la zona norte de la entidad), simultáneamente a Ciudad Ixtepec. Esto indica que existe un crecimiento de forma vertical en la zona del CIIT, la cual sigue creciendo de forma exponencial por medio de la generación de los ya declarados Polos de Desarrollo para el Bienestar (PODEBIS) (Gobierno de México, 2023) (véase figura 3).

Figura 3. Total de población de los municipios del estado de Oaxaca que integran el CIIT

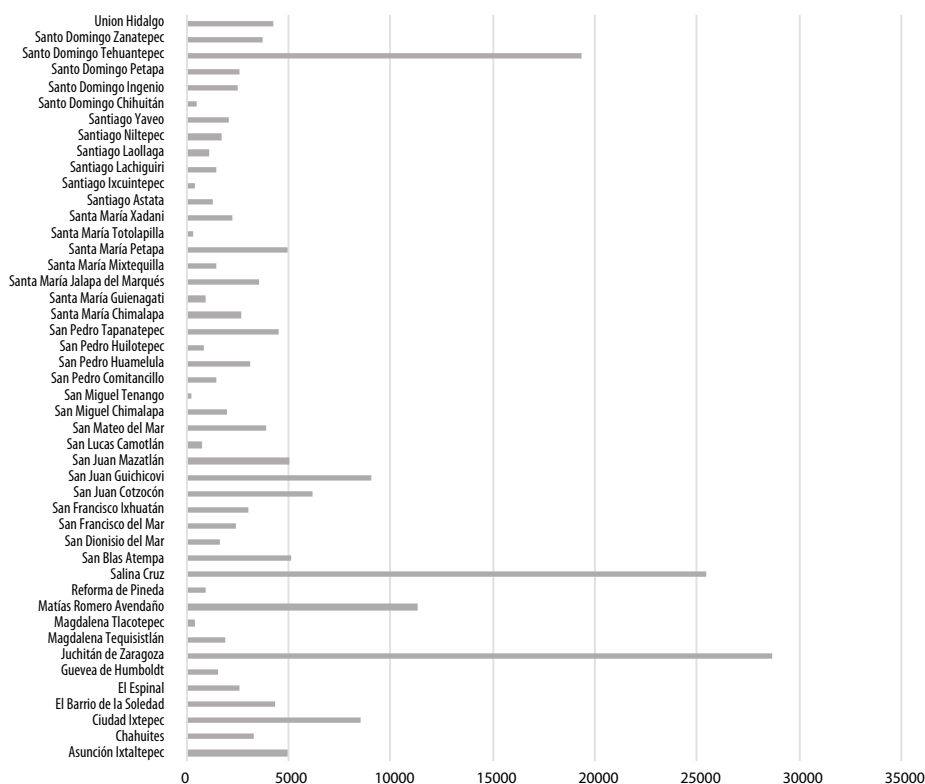


Fuente: elaboración propia con apoyo del software ArcMAP-ArcGIS Desktop 10.3, con base en datos obtenidos del marco geoestadístico nacional (INEGI, 2024).

Por otro lado, el total de las viviendas particulares habitadas se localizan en mayor medida en Juchitán de Zaragoza (con 28 668 viviendas), Salina Cruz (25 493 viviendas), y Santo Domingo Tehuantepec (con 19 381). Por el contrario los municipios con menor concentración de viviendas se ubican

en Magdalena Tlacotepec (con 419 viviendas), Santiago Ixcuintepec (con 411 viviendas), Santa María Totolapilla (con 294 viviendas) y San Miguel Tenango (con 226 viviendas) (véase gráfica 3).

Gráfica 3. Total de viviendas en los municipios del estado de Oaxaca que integran el CIIT en 2020

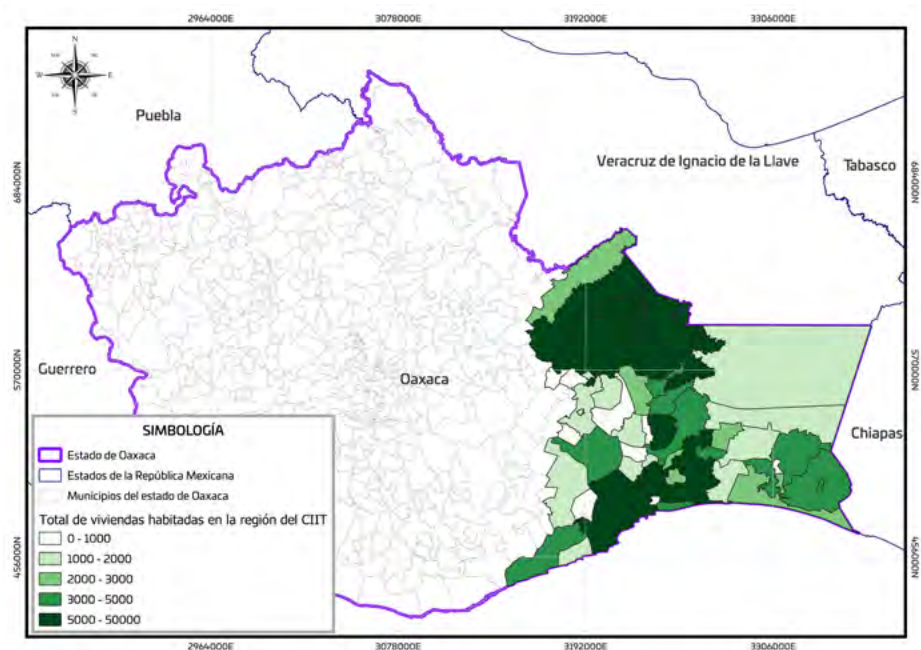


Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos del Censo de Población y Vivienda 2020.

De lo anterior, de forma espacial la mayor concentración de viviendas se ubica en la ZMT y en el municipio de Juchitán de Zaragoza (en la zona sur de la entidad); por otro lado, la mayor concentración se presenta en el municipio de Matías Romero Avendaño y en San Juan Guichicovi, San Juan Mazatlán, y San Juan Cotzocón (en la zona norte de la entidad), simultáneamente a Ciudad Ixtepec. Lo anterior presenta un crecimiento de forma

concentrada en la zona norte de la entidad junto en los límites del estado de Veracruz Ignacio de la Llave de la zona del CIIT (véase figura 4).

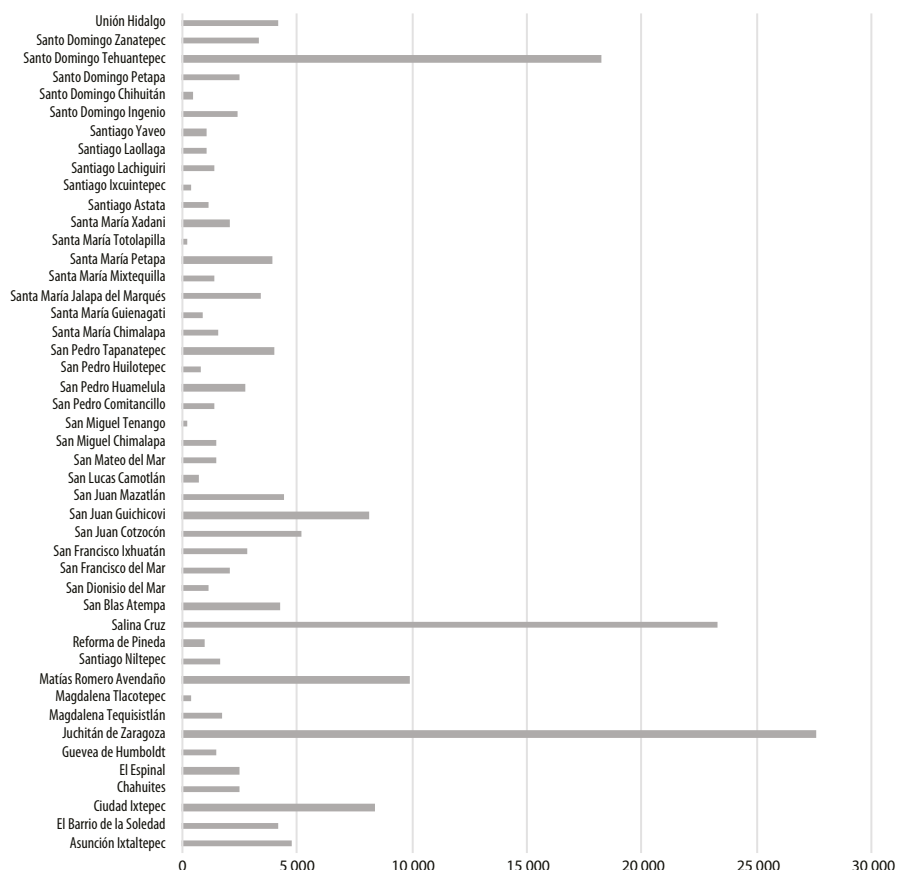
Figura 4. Total de viviendas habitadas en los municipios del estado de Oaxaca que integran el CIIT



Fuente: elaboración propia con apoyo del software ArcMAP-ArcGIS Desktop 10.3, con base en datos obtenidos del marco geoestadístico nacional (INEGI, 2024).

Por otro lado, la disponibilidad de agua en las viviendas se presenta en mayor medida en los municipios de Matías Romero Avendaño (con 9 948 viviendas), Santo Domingo Tehuantepec (con 18 256 viviendas), Salina Cruz (23 259 viviendas), y Juchitán de Zaragoza (27 604 viviendas). Por el contrario, los municipios que tienen menor número de viviendas con disponibilidad de agua son Santiago Ixcuintepec (411 viviendas), Magdalena Tlacotepec (396 viviendas), Santa María Totolapilla (285 viviendas) y San Miguel Tenango (214 viviendas) (véase gráfica 4).

Gráfica 4. Total de viviendas con disponibilidad de agua en los municipios del estado de Oaxaca que integran el CIIT en 2020

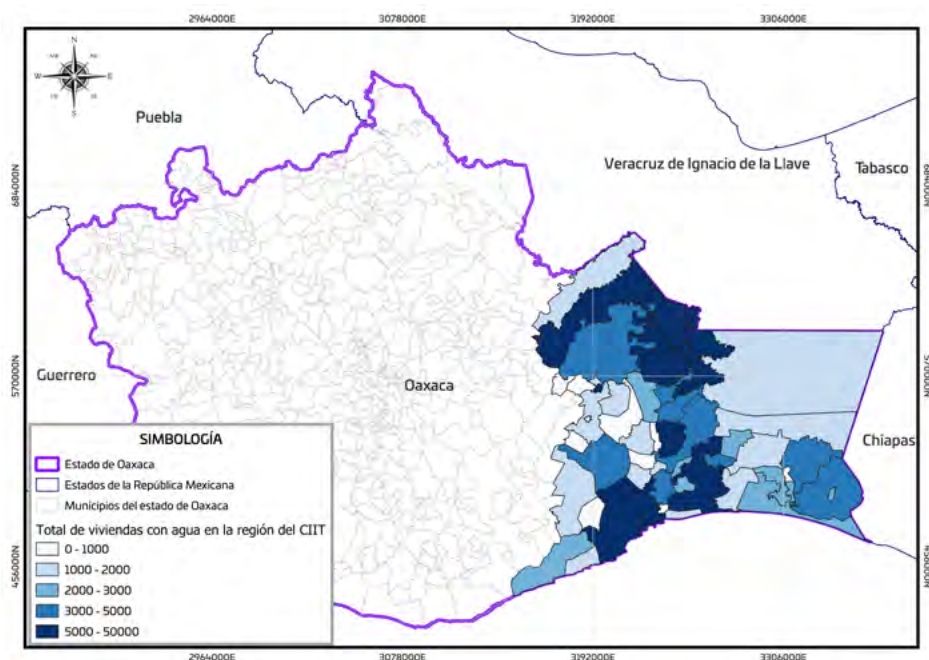


Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos del Censo de Población y Vivienda 2020.

Por lo tanto, los municipios con mayor número de viviendas que disponen de agua se concentran en la ZMT y en el municipio de Juchitán de Zaragoza (en la zona sur de la entidad); por otro lado, la mayor concentración se presenta en el municipio de Matías Romero Avendaño y en San Juan Guichicovi, y San Juan Cotzocón (en la zona norte de la entidad), simultáneamente a Ciudad Ixtepec. Esto indica que se espera un crecimiento exponencial de las viviendas con servicios de agua entubada por la ubicación de los PODEBIS en la región (véase figura 5).



Figura 5. Total de viviendas habitadas que disponen de agua en los municipios del estado de Oaxaca que integran el CIIT

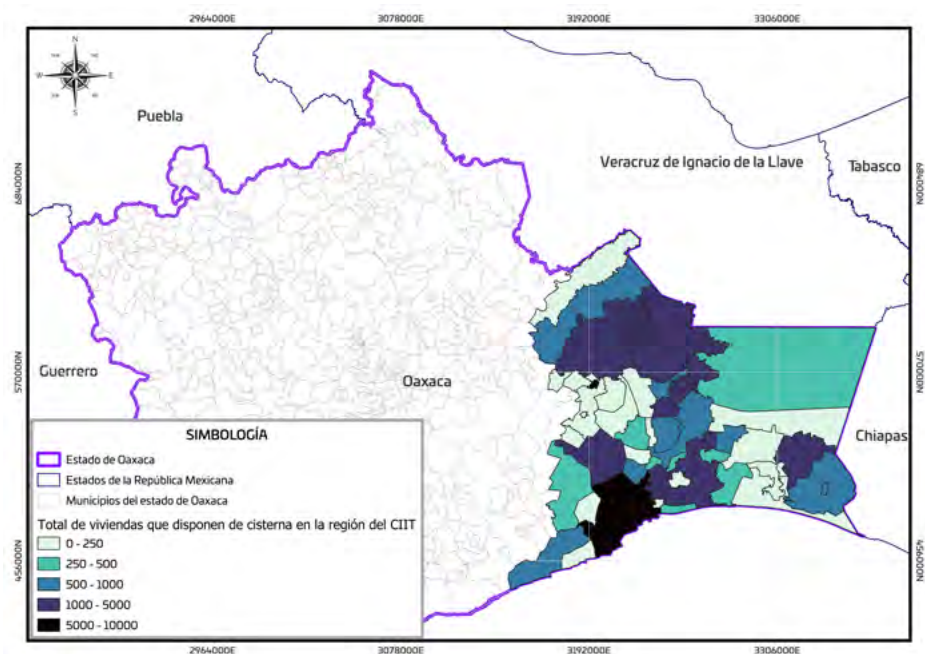


Fuente: elaboración propia con apoyo del software ArcMAP-ArcGIS Desktop 10.3, con base en datos obtenidos del marco geoestadístico nacional (INEGI, 2024).

Finalmente, las viviendas que disponen de una cisterna para almacenamiento de agua se presenta en mayor medida en los municipios de San Juan Guichicovi (3 950 viviendas), Juchitán de Zaragoza (4 116 viviendas), Santo Domingo Tehuantepec (6 935 viviendas) y, finalmente, Salina Cruz (7 072 viviendas). Por el contrario las viviendas con menor disponibilidad de cisterna se ubican en San Miguel Tenango (28 viviendas), Santa María Guianagati (25 viviendas) y San Lucas Camotlán (con 12 viviendas), todos estos para el año 2020 (véase figura 6).



Figura 6. Total de viviendas habitadas que disponen de cisterna en los municipios del estado de Oaxaca que integran el CIIT



Fuente: elaboración propia con apoyo del software ArcMAP-ArcGIS Desktop 10.3, con base en datos obtenidos del marco geostadístico nacional (INEGI, 2024).

## Conclusiones

El análisis del consumo hídrico en las viviendas en la región del IT, dentro del contexto del Corredor Interoceánico, ha permitido identificar factores clave que influyen en la disponibilidad, uso y gestión del agua en esta zona estratégica de México. Las conclusiones obtenidas a partir de este análisis destacan tanto las oportunidades como los desafíos para garantizar una gestión hídrica eficiente, equitativa y sostenible en las viviendas.

Uno de los hallazgos principales es que el consumo hídrico está estrechamente vinculado a las condiciones socioeconómicas de las viviendas. Las comunidades con menores ingresos suelen enfrentar mayores limitaciones para acceder al agua potable, dependiendo en muchos casos de

fuentes no reguladas, como pozos o manantiales. Esta situación agrava las desigualdades existentes, afectando la calidad de vida de los habitantes y su capacidad para adoptar prácticas de consumo.

Los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2023) revelan que las viviendas rurales tienen un acceso limitado al agua entubada, lo que obliga a las familias a recurrir a prácticas alternativas que no siempre garantizan la calidad del recurso. Esto confirma la necesidad de diseñar políticas públicas específicas para las áreas rurales y marginadas, que consideran la heterogeneidad de las condiciones locales.

En este sentido, la infraestructura hídrica en la región del IT presenta importantes deficiencias, tanto en términos de cobertura como de calidad. Aunque programas nacionales como PROAGUA han contribuido a mejorar el acceso al agua en algunas comunidades, todavía persisten brechas significativas. En particular, las viviendas que no cuentan con sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia enfrentan mayores dificultades durante las temporadas de sequía.

El análisis evidencia que las tecnologías de bajo costo, como las cisternas de captación de agua pluvial y los dispositivos ahorradores, representan soluciones viables para optimizar el consumo hídrico en las viviendas. Sin embargo, su adopción está condicionada por el acceso a subsidios y la capacitación de los usuarios, lo que subraya la importancia de las políticas públicas para fomentar su implementación.

En este sentido, el papel de las políticas públicas en la gestión hídrica es crucial para garantizar un acceso equitativo y sostenible al recurso. Sin embargo, en la región del IT, estas políticas han demostrado ser insuficientes para atender las necesidades específicas de las viviendas. La falta de coordinación entre los niveles de gobierno y la limitada participación comunitaria en el diseño e implementación de estas políticas son factores que han restringido su efectividad. En este sentido, es esencial que las estrategias de desarrollo vinculadas al CIIT incorporen una planificación hídrica que priorice el abastecimiento a las viviendas, evitando conflictos por el uso del recurso entre los sectores doméstico, agrícola e industrial.

Finalmente, el análisis del consumo hídrico en las viviendas del Istmo de Tehuantepec resalta la necesidad de adoptar un enfoque sostenible que equilibre las demandas actuales con la disponibilidad futura del recurso.

Esto incluye el fortalecimiento de las políticas públicas, la implementación de tecnologías adaptadas al contexto local y la promoción de una cultura del agua basada en la responsabilidad compartida.

En el futuro, investigaciones adicionales que integren métodos cualitativos y cuantitativos podrían proporcionar una comprensión más profunda de las dinámicas de consumo hídrico en las viviendas. Asimismo, la colaboración entre actores gubernamentales, académicos y comunitarios será clave.

## Referencias

- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association-LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93-115.
- Arreguín-Cortés, F., López Pérez, M., Marengo Mogollón, H. y Tejeda González, C. (2007). Agua virtual en México. *Ingeniería hidráulica en México*, XXII(4), 121-132.
- Babbie, E. R. (2020). *La práctica de la investigación social*. Cengage Au.
- Biswas, A. K. (2004). Integrated water resources management: a reassessment: a water forum contribution. *Water International*, 29(2), 248-256.
- Comisión Nacional del Agua [Conagua]. (2024). *Programas federales de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Programa de Agua Potable, Drenaje y Tratamiento (PROAGUA)*. Conagua. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/proagua>
- Domínguez, R. y García, L. (2021). *Estrategias de gestión hídrica en viviendas mexicanas*. Revista de Estudios Urbanos y Ambientales.
- Engel, E. (1857). *La ley del consumo*. Zeitschrift des Statistischen Bureaus des Königlich Sächsischen Ministeriums des Innern.
- Falkenmark, M. y Rockström, J. (2021). *Resiliencia hídrica para la prosperidad humana*. Londres: Routledge.
- Gilbert, A. y Gugler, J. (1992). Cities, poverty and development: Urbanization in the Third World. En *Cities, poverty and development: urbanization in the third world* (pp. 331-331). Oxford University Press.
- Gleick, P. H. (1993). *Water in crisis* (Vol. 100). New York: Oxford University Press.
- Gleick, P. H. (1996). Requerimientos básicos de agua para actividades humanas: satisfacción de las necesidades básicas. *Water International*, 21(2), 83-92.
- Gobierno de México (2023). *Polos de Desarrollo para el Bienestar (PODEBIS)*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/ciit/articulos/polos-de-desarrollo-para-el-bienestar-podebis>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2000). *Subsistema de Información Demográfica y Social, XII Censo General de Población y Vivienda 2000*. INEGI. [https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/#datos\\_abiertos](https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/#datos_abiertos)

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2010). *Subsistema de Información Demográfica y Social, Censo de Población y Vivienda 2010*. INEGI. [https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/#datos\\_abiertos](https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/#datos_abiertos)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020). *Subsistema de Información Demográfica y Social, Censo de Población y Vivienda 2020*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#microdatos>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2022). *Panorama de los gobiernos municipales de México 2022*. INEGI. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/889463919520.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463919520.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2023). *Estadísticas a propósito del Día Mundial del Agua*. INEGI. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2023/EAP\\_Agua23.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2023/EAP_Agua23.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2024). *Geografía y Medio Ambiente, Marco Geoestadístico*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#descargas>
- Le Corbusier. (1933). *La ville radieuse*. París: Ediciones Vincent, Fréal et Cie.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. y Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems*. John Wiley & Sons.
- López, R. y Sánchez, M. (2022). Consumo hídrico y desigualdades en el Istmo de Tehuantepec. *Revista Mexicana de Recursos Hídricos*, 15(3), 45-67.
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2010). *El derecho humano al agua y al saneamiento*. ONU. [https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human\\_right\\_to\\_water.shtml#:~:text=El%20derecho%20al%20agua,y%20al%20saneamiento,de%20todos%20los%20derechos%20humanos](https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml#:~:text=El%20derecho%20al%20agua,y%20al%20saneamiento,de%20todos%20los%20derechos%20humanos)
- Organización de las Naciones Unidas [ONU-Hábitat]. (2019). *Elementos de una vivienda adecuada*. ONU-Hábitat. <https://onu-habitat.org/index.php/elementos-de-una-vivienda-adecuada>
- Pérez Sánchez, L. F. y Fuentes Ávila, O. Z. (2022). *Concentración poblacional y desigualdades socioeconómicas: los megaproyectos del gobierno federal y su impacto en el desarrollo de la Región Sur-Sureste. Caso Tren Maya*. UNAM.
- Renwick, M. E. y Green, R. D. (2000). ¿Están a la altura las políticas de gestión de la demanda de agua residencial?. *Environmental and Resource Economics*, 15(1), 93-117.
- Rogers, P., Silva, R. D., Bhatia, R. (2002). Water is an economic good. How to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability. *Water Policy*, 4(1), 1-17. doi:10.1016/S1366-7017(02)00004-1
- Sampieri, R., Fernández, C. y Baptista, L. (2014). *Metodología de la investigación*. Mc Graw Hill. Education.
- Sistema de Información de Agua y Saneamiento Rural [SIASAR]. (2023). *Oaxaca, México*. SIASAR. <https://globalsiasar.org/es/paises/oaxaca-mexico>
- Soto Santos, A. K. (2023). *El espacio público y la segregación en asentamientos periféricos de ciudades intermedias. Los casos de Morelia y Oaxaca* (Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Morelos).
- Tortajada, C. (2020). Agua, desarrollo y políticas públicas en América Latina. *Revisión de Políticas de Desarrollo*, 38(1), 75-91.

- Tortajada, C. y Castelán, E. (2003). Políticas para la gestión de la demanda de agua en la Ciudad de México. *Revista Internacional de Desarrollo de Recursos Hídrico*, 19(2), 153-165.
- Turner, B. y Johnson, W. C. (1980). Una represa maya en el valle de Copan, Honduras. Yaxkin. *Organo de Divulgacion del Instituto Hondureno de Antropologia e Historia Tegucigalpa*, 3(3), 199-209.



## 4. Cambio climático y transformación territorial en zonas rurales de la Huasteca Hidalguense, México

XOCHITL VIRGINIA BELLO YAÑEZ\*

MARÍA CONCEPCIÓN MARTÍNEZ RODRÍGUEZ\*\*



<https://doi.org/10.52501/cc.364.04>

### Resumen

Los efectos del cambio climático comienzan a presentarse en todos los rincones del mundo, desde las grandes urbes hasta zonas más remotas, no hay lugar ni ser vivo que escape al impacto. Pareciera que en las ciudades las consecuencias de la alteración del equilibrio natural del planeta se encuentran más presentes, sin embargo, pudiera ser que en las zonas rurales también impacte fuertemente. En los últimos años se han vislumbrado con más nitidez los efectos negativos en el campo, como disminución en las cosechas, alteración del suelo, aumento en las enfermedades del ganado, decrecimiento de flora y fauna, sequías, olas de calor, heladas, inundaciones, etc. El presente trabajo se desarrolló en las comunidades de Maxala y Jalapa, pertenecientes al municipio de Zacualtipán, Hidalgo, México, y tiene como objetivo analizar los efectos del cambio climático en zonas rurales desde un enfoque social, ambiental y económico. Por medio de la investigación narrativa, apoyada en entrevistas aplicadas a los pobladores de la zona, se obtuvo que el cambio climático afecta en los ámbitos antes mencionados a estas regiones. Es necesario que se implementen más políticas públicas y programas sociales (haciendo hincapié en la educación ambiental) para aminorar la decadencia ambiental.

---

\* Doctorante en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0201-5946> ; Scopus: 59305520800 ; correo electrónico: xochbell2708@gmail.com

\*\* Doctora en Políticas Públicas. Profesora-investigadora en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>

**Palabras clave:** *cambio climático, educación ambiental, zonas rurales, concientización ambiental.*

## Introducción

El cambio climático es inequívoco, como lo evidencia el aumento en el promedio mundial de la temperatura de la atmósfera y el océano; el deshielo generalizado de los casquetes polares y glaciares; y el aumento del promedio mundial del nivel del mar (IPCC, 2007). Estos cambios son el resultado, aunque no intencionado, de la actividad humana (Naustdalslid, 2011).

La sociedad moderna basa sus actividades en la quema extensiva de combustibles fósiles como lo son el petróleo, el gas y el carbón, lo que genera un aumento en las emisiones a la atmósfera, combinado con el aumento de las emisiones de otros gases de efecto invernadero (GEI), como el metano, el óxido nitroso y los hidrofluorocarbonos; estos tienen un efecto de calentamiento global mucho más potente que el dióxido de carbono (Grupo Banco Mundial, 2022a), que también se deben a la actividad humana y, por lo tanto, derivan en el aumento de la temperatura global promedio, originando el cambio climático (Naustdalslid, 2011).

El cambio climático es la variación significativa de las condiciones climáticas promedio que se vuelven, por ejemplo, más cálidas, más húmedas o secas, durante ciertos periodos de tiempo; es la tendencia a largo plazo la que diferencia el cambio climático de la variabilidad climática natural (The World Bank Group, 2021b). Al estudiar las causas y efectos referentes al cambio climático aumenta la comprensión de los efectos mundiales y nacionales en los ecosistemas naturales de la agricultura, ganadería, entre otras actividades humanas, así como se generan conocimientos para el desarrollo de diversas estrategias de adaptación y mitigación (Viner et al., 1995).

El siglo XXI es el periodo más cálido que se ha registrado desde 1880, lo que conlleva a que el problema del cambio climático sea un tema central en el área de la política mundial (Sun y Yang, 2016). Durante este periodo se han experimentado diversos cambios fundamentales a nivel global que afentan las condiciones para la vida en la tierra tal como la conocemos hoy en día (IPCC, 2007).



El sexto informe de evaluación del IPCC, publicado en 2021, encontró que las emisiones humanas de gases de efecto invernadero han logrado calentar el clima medio mundial en casi 2 grados Fahrenheit (1.1°C), considerando desde la época preindustrial. Con estos datos se espera que esta temperatura alcance o supere los 1.5 grados Celsius en las próximas décadas, lo que afectará todas las regiones de la tierra (NASA, 2021).

El clima mundial sigue cambiando rápidamente en comparación con el ritmo de las variaciones naturales del clima que se han producido a lo largo de la historia de la Tierra (The World Bank Group, 2021b).

Con esto, los efectos futuros a causa del cambio climático global se prevé que sean (Appendini y Liverman, 1994; Coronado, 2023; Cuevas, et al., 2022):

- El clima global continúe calentándose durante este siglo y en adelante.
- Los científicos proyectan que la intensidad de las tormentas asociadas con los huracanes y las tasas de lluvia aumentarán a medida que el clima continúe calentándose.
- Más sequías y olas de calor. Cabe destacar que el número y la duración de las sequías han aumentado 29 % desde principios del siglo XXI. Lo que afecta a millones de personas que padecen escasez de agua.
- Temporada de incendios forestales más larga.
- Cambios en los patrones de precipitación.
- Aumento en el nivel del mar debido a deshielos.

Estos impactos son evidentes en todas las regiones y en muchos sectores importantes para la sociedad, como en la salud humana, agricultura, suministro de agua, transporte, seguridad alimentaria, la energía, la biodiversidad y los ecosistemas. Y se espera que los impactos se vayan agravando en las próximas décadas (The World Bank Group, 2021b).

México ocupa el decimotercer lugar como emisor de gases de efecto invernadero del mundo y el segundo de América Latina (The World Bank Group, 2020). Por lo que desde finales del siglo XIX, pero más evidente en los últimos 50 años, con el continuo desarrollo industrial y la gran pérdida de bosques y selvas, entre otros factores, el país ya se encuentra experimentando diversos cambios que implican un alto riesgo para todas las formas de vida (The World Bank Group, 2013).

Algunas de las señales de que este cambio climático ya está afectando nuestro país son las siguientes (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016; Jauregui, 1997):

- Aumento de la desertificación. Lo que significa el desecamiento de ríos, muerte de especies animales y vegetales, e impacto en los mantos freáticos. Se contabilizó una disminución anual en la precipitación del 11 %, lo que ha propiciado la intensidad y prolongación de los periodos caniculares (olas de calor) y sequías agrícolas.
- Aumento extremo de temperatura. En la Ciudad de México, en los últimos años, se ha detectado un incremento de la temperatura de casi 4 grados Celsius.
- Cambios en la forma en que llueve. Se ha registrado en diversos estados de la república mexicana que el número de tormentas intensas ha ido en aumento.
- Adelanto en las épocas de calor y extensión de su duración.
- Pérdida de bosques. Se ha acelerado la pérdida de bosques y vegetación en nuestro país. Así como el aumento de incendios forestales que se asocian también con el aumento de la temperatura.
- Desaparición de los glaciares. Los glaciares más importantes de México, ubicados en los volcanes Pico de Orizaba, Popocatepetl e Iztaccíhuatl, están disminuyendo su extensión.

En 2014, México se ubicó en la posición 48 del Índice de Riesgo Climático Global que cubre los años 1993–2012. Por su ubicación geográfica entre cinco placas tectónicas, más de las dos terceras partes de la población del país está expuesta a la actividad volcánica y sísmica, además de que las costas del Pacífico y del Atlántico sufren huracanes y tormentas tropicales (Ochoa y Ayvar, 2015), donde su frecuencia e intensidad provocan deslaves e inundaciones, entre otras afectaciones (Cuevas et al., 2022). A su vez las poblaciones rurales presentes en el país tienden a ser más vulnerables ante los fenómenos meteorológicos extremos debido a su dependencia con el medioambiente para su sustento (Ochoa y Ayvar, 2015).

Debido a la dependencia de las poblaciones rurales con el medioambiente, los cambios climáticos afectan el rendimiento de los cultivos, gene-

ran la pérdida de ganado y propician la destrucción de siembras, esto originado por las variaciones extremas de las temperaturas que provocan en las zonas de transmisión, que las plagas y enfermedades se propaguen de forma acelerada con consecuencias devastadoras en el sector agropecuario (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015). Derivado de estas consecuencias del cambio climático, las poblaciones rurales podrían verse obligadas a migrar, principalmente a ciudades donde los ingresos no sean dependientes únicamente de la agricultura (Ochoa y Ayvar, 2015).

Esta investigación muestra los resultados de las entrevistas realizadas a pobladores de las comunidades de Jalapa y Maxala, ubicadas en el municipio de Zacualtipán, Hidalgo, México, con la finalidad de conocer su experiencia y perspectiva desde un enfoque integral acerca de los efectos del cambio climático tanto en la zona donde habitan, así como en sus actividades cotidianas.

## **Materiales y metodología**

### **Zona de estudio**

El presente trabajo se desarrolló en dos comunidades ubicadas en la Sierra Huasteca hidalguense: Jalapa y Maxala, ambas pertenecientes al municipio de Zacualtipán de Ángeles en el estado de Hidalgo y con coordenadas 20° 38' 42" N – 98° 38' 13" W, a 1 979 metros sobre el nivel del mar, este municipio representa el 1.3 % del territorio hidalguense y para el año 2020 contaba con una población de 38 155 habitantes (47.5 % hombres y 52.5 % mujeres) (INEGI, 2020).

La zona de estudio pertenece a la región agrícola II Huastecas, la cual está conformada por Tantoyuca, Tamaulipas, San Luis Potosí e Hidalgo (Secretaría del Bienestar, 2022). Asimismo, se encuentra dentro de la provincia Sierra Madre Oriental, subprovincia Carso Huasteco, distribuidos entre sierra (43.99 %) y meseta (56.01 %), convirtiéndola en una región con considerables pendientes geográficas (INEGI, 2010).

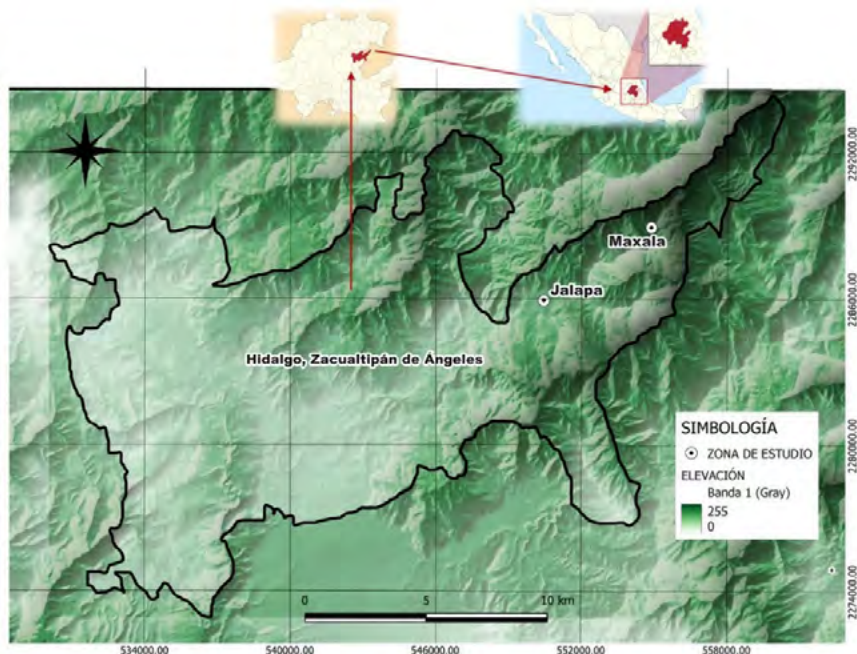
Esta demarcación cuenta con un 56.09 % de bosque, 11.99 % de pastizales, 3.26 % de matorral y 1.52 % de selva; referente al uso del suelo, el

24.61 % se utiliza para la agricultura (20.23 % agricultura manual continua y el 4.05 % agricultura con tracción animal estacional), 2.63 % es zona urbana y el 75.72 % no es terreno apto para la agricultura (INEGI, 2010). El clima va de templado húmedo con lluvias todo el año a semicálido húmedo (INEGI, 2020b).

En Zacualtipán de Ángeles hay numerosos pueblos nativos, en los que se hablan lenguas indígenas como mixteco, otomí y, principalmente, náhuatl, puntualmente en la comunidad de Maxala los pobladores hablan náhuatl (también conocido como mexicano) y español.

El poblado de Jalapa se encuentra aproximadamente a 28 kilómetros de la cabecera municipal (Zacualtipán de Ángeles) y se accede por medio de un camino de terracería; Maxala es una población enclavada en la Sierra que se localiza a 7 kilómetros de Jalapa, no cuenta con camino de acceso para autos, solo se puede llegar por veredas que circundan los montes a través de un territorio semi-escarpado (ver figura 1).

Figura 1. Mapa de ubicación de las comunidades de Jalapa y Maxala



Fuente: elaboración propia.

En Jalapa se contabilizó una población de 501 habitantes para el año 2010, de los cuales el 19.94 % era analfabeta, el 56.49 % de la población no contaba con servicio de salud, el 43.33 % de viviendas no tenían piso, 14.17 % de viviendas sin red de drenaje, 85.83 % de viviendas sin lavadora y 69.17 % sin refrigerador; así como con un grado de rezago social medio (CONEVAL, 2010).

Según CONEVAL (2010), la comunidad de Maxala para el año 2010 estaba catalogada con un muy alto grado de marginación, contabilizando un total de 128 pobladores; para el mismo año, el 45.45 % de la población era analfabeta, 23.33 % no asistía a la escuela, el 96.10 % tenía educación básica incompleta, 99.22 % sin derecho a servicios de salud, 85.71 % de viviendas sin drenaje, 80 % de casas sin red eléctrica, y el 100 % de viviendas sin lavadora y refrigerador. El poblado en general no cuenta con red eléctrica, se utilizan celdas solares para el suministro de energía, lo que algunas veces resulta insuficiente y limita el uso de gasto energético.

## Metodología

El presente trabajo se desarrolló en dos etapas. La primera consistió en investigación de campo con una metodología narrativa, que contempló la observación no estructurada, mediante la recolección de datos a través de entrevistas a habitantes de las comunidades de Jalapa y Maxala.

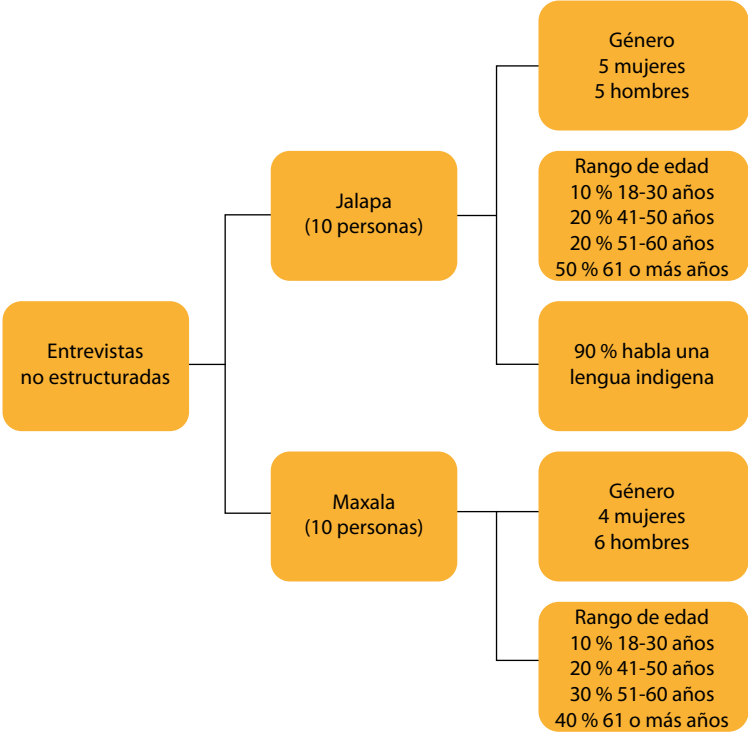
La metodología empleada pretende plantear una ruta de construcción social mediante los relatos de los lugareños entrevistados (Arias-Cardona y Alvarado-Salgado, 2015), que derive el saber en cuanto a la parte ambiental y económica que afecta su entorno cotidiano.

Los entrevistados se eligieron de acuerdo con características particulares, con la finalidad de obtener información y conocimiento en concreto (Tejero-González, 2021). En cada comunidad se entrevistaron 10 personas (20 total por ambas poblaciones).

El grupo focal estuvo conformado por hombres y mujeres de distintas edades, con la finalidad de obtener la percepción de acuerdo con el rango de edad y género para posteriormente desarrollar un estudio comparativo (ver figura 2). Si bien se plantearon preguntas específicas, se dejó abierto el dialogo para indagar en los relatos de los pobladores y profundizar en los

puntos importantes que atañen a la investigación. Las entrevistas se realizaron con equipo de videograbación, así como la toma de notas escritas, además de un diario de campo, con la finalidad de plasmar la información obtenida para su análisis posterior.

Figura 2. Género y edad del grupo de personas entrevistados



Fuente: elaboración propia.

La segunda parte de este trabajo está conformada por el análisis de datos y experiencias obtenidas sobre la percepción que tienen los habitantes en cuanto al cambio climático, considerando el aspecto ambiental, social y económico.

## Resultados y discusión

A través de los relatos recopilados de los pobladores de las comunidades de Jalapa y Maxala se encontró que, en los últimos años, las condiciones climáticas se han alterado. Las olas de calor se han hecho más prominentes e intensas, lo que genera sequías y, por ende, poca disponibilidad de agua para los cultivos y el ganado. Durante la temporada de lluvias, los huracanes cada vez golpean con más fuerza, lo que ocasiona el desbordamiento del río e inundaciones, y generando a su vez daños a casas, vías de comunicación, infraestructura pública y cultivos. En la época de frío, las heladas suelen afectar más a los sembradíos, lo que genera que la agricultura sea menos rentable y menor disponibilidad de productos alimentarios, tanto para consumo propio, como para comercializar.

Los cambios en el clima originan pérdida económica en actividades como la agricultura y la ganadería, por lo que cada vez es más difícil la subsistencia de las familias, lo que conlleva a que miembros de las familias (o algunas veces familias completas) busquen otras fuentes de trabajo, desencadenando el fenómeno migratorio, ya sea hacia urbes como la Ciudad de México o a países como Estados Unidos.

La separación de familias debido a la migración de alguno de miembros (principalmente el padre) suele suscitar disfunción social negativa en las mismas. La ausencia de la figura paterna, materna o ambas genera que los niños no tengan la guía familiar adecuada, esencial en la infancia, dando como resultado una tendencia hacia la deserción escolar, alteración psicológica (violencia principalmente en hombres) o embarazo a temprana edad.

## Más es menos: el cambio climático está presente

Las alteraciones del clima se han acentuado en la zona, lo que ha modificado patrones sociales, económicos y ambientales que habían prevalecido durante décadas, aunque los habitantes con más edad perciben el cambio en el clima, los más jóvenes son los que se enfrentan a la falta de oportunidades para permanecer en sus lugares de origen.

Aunque Jalapa cuenta con más habitantes que Maxala, su población se ha visto mermada debido a la migración de los jóvenes hacia el extranjero (principalmente a Estados Unidos) y hacia la CDMX en busca de fuentes de trabajo que les permita otorgarles una buena calidad de vida a sus familias, misma que según su concepción, el trabajo en el campo no les podría conferir.

Guadalupe<sup>1</sup>, una joven de 27 años, menciona que cuando asistía a la secundaria de un total de 20 estudiantes que conformaban su generación, solo ella se encuentra viviendo actualmente en Jalapa, los 19 restantes decidieron migrar hacia otros lugares, ya sea para continuar estudiando o para realizar trabajos con mejor remuneración económica y con un salario fijo, ya que al comercializar productos agrícolas, un día se puede adquirir ingresos económicos por la venta y al otro no. Desde la perspectiva de la población joven, el trabajo en campo es muy pesado debido a las condiciones climáticas cada vez más extremas, además de que tienen que recorrer largas distancia a través del monte para llegar a las zonas de siembra, aunque con el trabajo en campo se puede subsistir alimentariamente, no da para poder construir una vivienda digna. Según Guadalupe, se podría regresar al trabajo en el campo si las condiciones económicas y ambientales fuesen más asequibles.

Doña Honoria<sup>2</sup> nos cuenta que el ambiente se ha ido deteriorando a través del tiempo, antes la tierra producía más alimentos, por ejemplo, la milpa daba mazorcas con granos de maíz grande, ahora las mazorcas son más pequeñas y con menos granos, además de que hay áreas de cultivo que ya no producen, cuando se sembraba el suelo estaba suelto y ahora tiene consistencia arcillosa, debido posiblemente a los herbicidas que se les coloca para eliminar las hierbas no deseadas (jihuite) y la fauna nociva, aunque hace la observación de que los químicos utilizados también dañan a los organismos que no hacen daño, como las abejas, las cuales hace un par de décadas estaban presente todo el tiempo y por todos lados, incluso una

<sup>1</sup> Ama de casa entrevistada que radica en Jalapa, su esposo tuvo que migrar recientemente y por tiempo indefinido a Estados Unidos en busca de mejores condiciones de trabajo.

<sup>2</sup> Mujer de 88 años habitante de Jalapa, a los 11 años llegó a este poblado y desde entonces ha permanecido ahí, tiene 6 hijos, de los cuales, solo uno se dedica al campo, tres hijas al hogar (también en Jalapa), una hija vive en la cabecera municipal de Zacualtipán y una más migró hacia Estados Unidos.



parte de los pobladores se dedicaban a la apicultura, sin embargo, hoy en día ya no hay más producción de miel en la zona.

## El cambio climático y las comunidades olvidadas

Para llegar a la comunidad de Maxala se debe de recorrer un agotador camino que atraviesa la serranía, solo hay acceso a pie o por caballo. Este es un lugar alejado de los beneficios de la modernidad, y si bien aún se puede respirar aire con pureza total y se disfruta de tranquilidad mental y física debido a la verde y natural inmensidad que emana de la serranía que rodea a este lugar, no se encuentra libre de impacto ambiental. Los lugareños perciben el daño a la naturaleza, mismo que está presente en las memorias de las personas de más edad, quienes apuntan a que las hectáreas de bosque han disminuido considerablemente; la fauna también ha ido en decadencia; la tierra ya no produce la misma cantidad y calidad de producto; el calor cada año se siente más intenso; y las lluvias son escasas, pero más destructivas cuando se presentan.

Los habitantes de Maxala precisan la negativa transformación ambiental del lugar, saben del problema y lo que este provoca localmente hablando; precisan que antes de pensar en procurar el medioambiente, deben satisfacer sus necesidades básicas como la alimentación, vestimenta y techo, situación que no solo acucia a esta zona, sino a miles de poblaciones en México y millones alrededor del mundo.

Desde que se llega a este pequeño poblado se siente la sensación de transportarse a otro mundo, la tecnología que abunda en las urbes aquí no es funcional (no cuentan con refrigerador, estufa o lavadora), ya que la disponibilidad de energía es limitada, su abastecimiento energético es por medio de celdas solares que están instaladas en cada vivienda, situación que hace que el suministro de energía sea sustentable y sostenible.

Y aunque esta zona no genera emisiones de gases tóxicos que contribuyan al calentamiento de la atmósfera, si está siendo afectada por los efectos de sobrecalentamiento global. Don Fernando<sup>3</sup> menciona que desde hace un

---

<sup>3</sup> Agricultor de 55 años que radica en Maxala; ha vivido en el poblado toda su vida.

par de años árboles frutales que solo se podían plantar en zonas más cálidas, ahora ya se pueden encontrar en Maxala, y piensa que es debido al aumento de la temperatura de la zona.

A pesar de que hay zonas que aportan cero contaminantes, hay zonas, como en el caso de Maxala, que con sus bosques contribuyen a la reducción del carbono de la atmosfera; son estas las más afectadas, ya que adicional a la carencia de servicios básicos, como la red eléctrica, vías de comunicación eficientes, servicio de salud y de educación, la situación de las familias se encarece al verse afectados por fenómenos propios del cambio climático, como poca disponibilidad de lluvias para sus sembradíos, deslaves en los caminos provocados por lluvias excesivas, e incendios que minan la flora de la región. Como menciona Ema,<sup>4</sup> “en todo el mundo hay demasiadas personas que necesitan ayuda, pero hay zonas donde se necesita más, como lo es Maxala, y a pesar de eso el gobierno parece haberse olvidado de nosotros”.

Los problemas que en general perciben los habitantes entrevistados de estas dos regiones, en cuanto el ámbito ambiental, son los siguientes:

- Aumento de la temperatura.
- Disminución y alteración de la temporada de lluvias.
- Fenómenos meteorológicos más destructivos.
- Olas de calor cada vez más continuas que causan incendios.
- Reducción de la fauna y flora autóctona.
- Alteración del suelo, lo que aminora la eficiencia para su producción agrícola.

En cuanto al impacto social y económico del cambio climático, los lugareños entrevistados en estas dos comunidades coinciden en que:

- Han disminuido las oportunidades para dedicarse a la agricultura y ganadería, debido a la alteración del clima.
- Migración hacia zonas urbanas, que ocasiona disfunción familiar y pérdidas de tradiciones y saberes ancestrales.

---

<sup>4</sup> Ama de casa indígena de 43 años que radica en Maxala; lleva viviendo en este lugar 23 años.

- Reducción del número de habitantes en las comunidades, quedando en su mayoría los grupos más vulnerables como lo son adultos mayores, mujeres y niños.
- Aumento en los niveles de violencia.
- Aumento en la deserción escolar.
- Proliferación en los embarazos de jóvenes.
- Crecimiento de los niveles de pobreza y marginación.

## Conclusiones

Aunque se trate de evadir el tema del cambio climático, el problema está presente en todo el mundo, desde las grandes urbes, hasta las zonas más recónditas; el ser humano, en su aventura hacia la construcción de la utopía de un mundo mejor, daña la naturaleza, muy probablemente de manera irreversible.

Los efectos destructivos de los fenómenos naturales alterados por los gases de efecto invernadero afectan mayormente a la población con menos recursos económicos, aunque esta porción es la que menos contribuya a la producción de contaminantes, como es el caso de las zonas rurales.

Si no se aborda el cambio climático, se espera que la economía mexicana se reduzca entre 3.5 y 4 % y sufra costos significativos de hasta 6.2 % del PIB.

Es imprescindible que los gobiernos se comiencen a centrar en formular e implementar estrategias integrales para aminorar las carencias en las comunidades, brindándoles herramientas para que el impacto del cambio climático sea el menor posible.

Se debe de voltear a ver a las zonas rurales y priorizarlas, ya que:

- Son las que, por medio de la agricultura suministran alimentos a los habitantes de las urbes.
- Son las que menos generan contaminantes.
- Mediante sus bosques y selvas brindan servicios ambientales, como la reducción de carbono de la atmósfera.
- Perpetúan el saber y costumbres de los pueblos originarios (que ya se perdieron en las ciudades).

La educación ambiental debe llegar hasta estos lugares, el gobierno con instituciones académicas y científicas están obligados a acercarse a las comunidades y conjuntar nuevos e innovadores conocimientos con los saberes ancestrales de los pobladores.

Ahora mismo es un punto de inflexión en la historia del *Homo sapiens*, se debe de decidir entre la continuidad del actual camino en el que se coloca, asimismo como dueño de la naturaleza, o desviar su ruta y comenzar a caminar consiente de que solo es una pequeña parte de naturaleza; debe elegir entre la devastación de la naturaleza para alcanzar su gloria o en la preservación y restauración para su subsistencia.

## Referencias

- Appendini, K. y Liverman, D. (1994). Agricultural policy, climate change and food security in Mexico. *Food Policy*, 19(2), 149-164. [https://doi.org/10.1016/0306-9192\(94\)90067-1](https://doi.org/10.1016/0306-9192(94)90067-1)
- Arias-Cardona, A. M. y Alvarado-Salgado, S. V. (2015). Investigación narrativa: apuesta metodológica para la construcción social de conocimientos científicos. *Revista CES Psicología*, 8(2011–3080), 171-181.
- Consejo Nacional de Evaluación para la Política de Desarrollo Social [CONEVAL]. (2010). *Población total, indicadores, índice y grado de rezago social según localidad*. CONEVAL.
- Coronado, Y. (2023). Agriculture systems dataset in rural communities of Hidalgo state, Mexico. *Data in Brief*, 47, 108918. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.108918>
- Cuevas Sandoval, S., Lemus Arriola, L. H., Valle Ramos, D. A. y Santibañez Aguascalientes, N. A. (2022). *Migración climática en México. El éxodo de las poblaciones rurales. Avance y Perspectiva*. <https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/migracion-climatica-en-mexico-el-exodo-de-las-poblaciones-rurales/>
- Folchi, M. (2019). Ecologismo de los pobres: conflictos ambientales y justicia ambiental. En L. E. Delgado, V. H. Marín (eds.), *Social-ecological systems of Latin America: complexities and challenges* (pp. 95-115). Springer Nature.
- Grupo Banco Mundial. (2022a, 1 de septiembre). *Lo que hay que saber sobre el cambio climático y la contaminación atmosférica*. Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2022/09/01/what-you-need-to-know-about-climate-change-and-air-pollution>
- Grupo Banco Mundial. (2022b, 14 de septiembre). *El Banco Mundial hace un llamado urgente a la acción climática en América Latina y el Caribe para acelerar la transición*

- hacia economías resilientes y bajas en carbono*. Banco Mundial. <https://www.banco-mundial.org/es/news/press-release/2022/09/13/banco-mundial-accion-climatica-urgente-america-latina-caribe-acelerar-transicion-bajas-emisiones-de-carbono>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010, Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo*. INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020a). Censo de Población y Vivienda 2020. INEGI.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020b). *Espacio y datos de México*. INEGI. <https://inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2007) *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2023). *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. [https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf)
- Jauregui, E. (1997). Climate changes in Mexico during the historical and instrumented periods. *Quaternary International*, 43-44, 7-17. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(97\)00015-3](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(97)00015-3)
- Martínez Alier, J. (2006). *El ecologismo de los pobres: conflictos ambientales y lenguajes de valoración*. Icaria Editorial.
- Melillo, J. M., Richmond T. C. y Yohe G. W. (eds.). (2014). *Climate change impacts in the Unites State, The third national climate assessment*. U.S. Global Change Research Program. <https://www.globalchange.gov/nca3-downloads-materials>
- National Aeronautics and Space Administration [NASA] (s. f.). *Los efectos del cambio climático*. NASA Ciencia. Recuperado el 20 de septiembre del 2025 de <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/los-efectos-del-cambio-climatico/>
- Naustdalslid, J. (2011). Climate change – the challenge of translating scientific knowledge into action. *International. Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 18(3), 243-252. <https://doi.org/10.1080/13504509.2011.572303>
- Ochoa Lupián, L. E. y Ayvar Campos, F. J. (2015), Migración y cambio climático en México. *Revista CIMEXUS*, X(1), 35-51. [https://www.researchgate.net/publication/342800935\\_Migracion\\_y\\_cambio\\_climatico\\_en\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/342800935_Migracion_y_cambio_climatico_en_Mexico)
- Organización Meteorológica Mundial [OMM]. (2020, 8 de julio). *Nuevas predicciones climáticas de las temperaturas mundiales de los próximos cinco años*. OMM. <https://wmo.int/es/media/nuevas-predicciones-climaticas-de-las-temperaturas-mundiales-de-los-proximos-cinco-anos>
- Pachauri, R. K. y Reisinger, A. (Dirs.). (2008). *Cambio climático 2007. Informe de síntesis*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4\\_syr\\_sp.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf)
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2015, 26 de septiembre). *El cambio climático afecta al campo ¿cómo enfrentarlo?* <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulo>

los/el-cambio-climatico-afecta-al-campo-como-enfrentarlo#:~:text=Estos%20cambios%20afectan%20el%20rendimiento,devastadoras%20en%20el%20sector%20agropecuario

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016, 20 de octubre). *Cómo afecta el cambio climático a México*. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/como-afecta-el-cambio-climatico-a-mexico>

Secretaría del Bienestar. (2022). *Acuerdo por el que se emiten las Reglas de Operación del Programa Sembrando Vida, para el ejercicio fiscal 2023*.

Sun, J. y Yang, K. (2016). The wicked problem of climate change: a new approach based on social mess and fragmentation, *Sustainability*, 8(12), 1312. <https://doi.org/10.3390/su8121312>

Tejero-González, J. M. (2021). Entrevistas estructuradas, semiestructuradas y libres. Análisis de contenido.

The World Bank Group Climate Change Knowledge. (2020). *Emisiones de gases de efecto invernadero totales (kt de equivalente de CO<sub>2</sub>)*. The World Bank Group. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.GHGT.KT.CE>

The World Bank Group Climate Change Knowledge. (2021a). *Extreme precipitation events*. The World Bank Group. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/mexico/extremes>

The World Bank Group Climate Change Knowledge. (2021b). *What is Climate Change?* The World Bank Group. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/overview>

The World Bank Group. (2013). *Mexico seeks to adapt to climate change and mitigate its effects*. The World Bank Group. <https://www.worldbank.org/en/results/2013/04/17/mexico-seeks-to-adapt-to-climate-change-and-mitigate-its-effects>

Viner, D., Hulme, M. y Raper, S. C. B. (1995). Climate change scenarios for the assessments of the climate change on regional ecosystems. *Journal of Thermal Biology*, 20(1-2), 175-190. [https://doi.org/10.1016/0306-4565\(94\)00047-M](https://doi.org/10.1016/0306-4565(94)00047-M)

## 5. Caracterización del sargazo, un residuo de manejo especial evaluado como sustrato para producción de biogás



MARIANA ABIGAIL MUÑOZ DÍAZ\*

LUIS RAÚL TOVAR GÁLVEZ\*\*

MARÍA EUGENIA GUTIÉRREZ CASTILLO\*\*\*

<https://doi.org/10.52501/cc.364.05>

### Resumen

En este capítulo se abordará una analogía de la problemática que implica el fenómeno de la macroalga pelágica conocida como sargazo (*Sargassum* spp.) que arriba al Caribe mexicano, y que al depositarse sobre sus playas en elevados volúmenes generan afectaciones a la flora, fauna, población e incluso economía de la región. La complejidad del manejo y gestión de residuos del sargazo se origina al desconocer las características fisicoquímicas que posee, así como la ausencia de una normativa oficial exclusiva que integre mecanismos de recolección, responsabilidades de su manejo y disposición final, y las posibles estrategias para su aprovechamiento o valorización.

Derivado de lo anterior se mencionará la normatividad actual aplicable en materia de residuos, así como algunos resultados de la caracterización fisicoquímica básica del sargazo y los hallazgos obtenidos en una alternativa de su manejo, mediante el estudio realizado para la optimización de la producción de biogás a partir de sargazo en codigestión anaerobia con la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), el cual arrojó un

---

\* Maestra en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad. Doctorante en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6885-676X>; correo electrónico: [mmunozd1100@alumno.ipn.mx](mailto:mmunozd1100@alumno.ipn.mx)

\*\* Doctor en Nutrición. Profesor-investigador en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0821-966X>

\*\*\* Doctora en Ciencias en la Especialidad de Toxicología. Profesora-investigadora en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1316-0244>

potencial poco viable del sargazo como bioenergético, esto asociado a la presencia del arsénico, un compuesto tóxico que puede limitar su aprovechamiento o valorización.

**Palabras clave:** *Sargassum spp*, sargazo, residuo de manejo especial, codigestión anaerobia, aprovechamiento del sargazo.

## Introducción

El arribo masivo de sargazo a las costas del Caribe mexicano, particularmente en el estado de Quintana Roo, México, es un fenómeno que data del año 2011; no obstante, la invasión marina de macroalgas flotantes no nativas del género *Sargassum spp.* se agudizó entre el verano del 2014 y hasta el invierno del 2015 (León, 2019; Rodríguez-Martínez et al., 2017). El influjo de algas cafés o pardas (*Phaeophyta*), del subgrupo de sargazo pelágico, integrado principalmente por dos especies de macroalgas *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* (Franks et al., 2011; Smetacek y Zingone, 2013), se ha presentado en extrema ocurrencia en periodos intermitentes y en cantidades sin precedentes, el pronóstico es que continúe, se incremente y expanda (Marks et al., 2017). La singularidad del sargazo no es exclusiva del Caribe mexicano, en otras regiones de África, Europa y Latinoamérica se ha observado afluencia masiva (Parra, 2022), asimismo en el noreste de América del Sur y todo el Caribe se ha reportado la presencia de cerca de 20 millones de toneladas métricas de biomasa de sargazo pelágico en playas (Wang et al. 2019) y, de acuerdo con Robledo et al. (2021), el punto máximo alcanzado y registrando en esta zona fue de una biomasa 200 veces mayor que en los 8-10 años anteriores.

Para la zona costera de Quintana Roo, México, los municipios de Benito Juárez, Solidaridad, Cozumel, Tulum y Othón P. Blanco reportaron un volumen total diario de sargazo de 71 353 m<sup>3</sup> en sus playas, lo que equivale a la llegada de 318.9 m<sup>3</sup>/km de playa al día (Rodríguez-Martínez et al., 2017), en tanto que reportes de la SEMA (2018) revelaron un volumen total de 144 959 m<sup>3</sup> de sargazo recolectado entre junio y diciembre de 2018 en playas de los municipios Benito Juárez, Cozumel, Isla Mujeres,



Othón P. Blanco, Solidaridad y Tulum. Estas recurrentes acumulaciones de toneladas de la biomasa residual de sargazo resultaron en notables daños económicos, sociales y ambientales en esta región, sobre todo si se considera que la actividad pesquera y turística en la región del Caribe mexicano representan el 15 % del Producto Interno Bruto (PIB) y 14 % de empleos en el país (Milledge et al., 2020). No solo se cerraron playas turísticas, también se perturbó la navegación marina y se produjeron cambios en el comportamiento de anidación de las tortugas marinas (Milledge y Harvey, 2016; Van Tussenbroek et al., 2017; NOAA/AOML, 2018). La economía de la región seguirá viéndose afectada; por ejemplo, el sector turístico en el estado de Quintana Roo reportó, para 2019, 26.4 millones de pasajeros en sus aeropuertos, 22.8 millones de visitantes y 7.2 millones de cruceristas; lo que se traduce a una derrama económica de 15 mil millones de dólares, cifra que se ve afectada por la presencia del sargazo y los gastos de limpieza para los propietarios de hoteles, cuya inversión oscila los \$54 000 dólares por mes, y un gasto estimado de \$120 millones de dólares por remoción de sargazo a través del Caribe de México (Milledge et al., 2020).

En relación a la afectación ambiental que produce el arribo excesivo del sargazo, es importante recordar que estas macroalgas del tipo holopelágico forman masas flotantes (gracias a sus neumatocitos o neumatoquistes, pequeñas esferas aparentemente llenas de oxígeno y trazas de nitrógeno) de gran valor ambiental en mar abierto, que se desplazan (cambiando de tamaño y ubicación) en función del rumbo de las corrientes oceánicas en aguas someras y acaban en las playas. Se ha identificado que aparecen en zonas tropicales y subtropicales con dos regiones del “mar de los sargazos”, ubicado al este del Estrecho de Florida y la región de recirculación ecuatorial norte, en el norte de Brasil (López et al., 2023). La función de este ecosistema milenario es transcendental, secuestra carbono y provee oxígeno y nutrientes por lo que conforma el hábitat y refugio de muchos organismos marinos como tortugas, diferentes especies de peces, camarones y cangrejos (Rooker et al., 2006; Witherington et al., 2012). No obstante, su crecimiento descontrolado puede generar muerte masiva de especies de flora y fauna, ya que la densidad de la macroalga no permite el paso de la luz y disminuye el oxígeno en la columna de agua, lo que perjudica particularmente a los arrecifes de coral; además de que afecta la reproducción

de las tortugas y aumenta la mortalidad de los peces (León, 2019; Espinosa y Li, 2020; Parra, 2022).

Los impactos del sargazo no están aislados de los problemas que ocasiona a la población, estos se asocian con los trabajos en el sector turístico y efectos a la salud al contacto con la macroalga, la cual puede ocasionar desde picazón, alergias y salpullido, derivado de la presencia de crustáceos similares a pulgas o hidrozooarios como anémonas o aguamala. Otra situación es que desprende gases en su proceso de descomposición como el metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ); además de contener concentraciones de metales pesados como el arsénico (As) que es altamente tóxico (León, 2019). De acuerdo con lo comentado en el trabajo de López et al. (2023), la gravedad en la salud por exposición a estos gases radica en que pueden provocar irritación de las vías respiratorias superiores, náuseas, dolor de cabeza, confusión y en situaciones extremas: lesiones pulmonares, neurológicas y cardiovasculares. En lo que respecta a los metales pesados, estos en altas concentraciones pueden provocar enfermedades gastrointestinales y renales, trastornos del sistema nervioso, daño vascular, lesiones cutáneas, defectos de nacimiento, hasta cáncer.

Si bien la presencia del sargazo genera diversos problemas, es inminente tener que resolver su presencia en las playas, así como el qué hacer con él y cómo evitar que continúe afectando. Para ello es necesario desarrollar estrategias de contención, recolección, manejo y gestión del sargazo, no obstante, para lograrlo primeramente se requiere conocerlo y clasificarlo adecuadamente para así generar directrices o normativas ideales que resuelvan la situación.

### **Estrategias existentes de recolección, manejo y gestión del sargazo**

Dentro de las acciones inmediatas para eliminar la presencia del sargazo se optó por ocultar al sargazo bajo la arena, además de recurrir a sistemas manuales o con maquinarias para recolectarlo, lo que genera alteraciones en el suelo de las playas e ignora la correcta disposición como residuo del sargazo. Esta acción se ejecutó principalmente por los propietarios del sector hotelero.

En lo que respecta a las acciones por el gobierno de México, León (2019) menciona que mediante el gobierno con apoyo de científicos y empresarios turísticos, a través de la SEMARNAT, se implementaron estrategias de contención y manejo del sargazo en 2015; esto a través de lineamientos que permiten disponer de las macroalgas recolectadas en la playa. Hacia el 2019 se publicó la primera versión de los lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe mexicano y el Golfo de México; dicho documento fue luego actualizado en 2021. Los lineamientos son provisionales para que, de alguna manera, se pueda enfrentar la contingencia del sargazo mientras expertos en el tema continúan definiendo una norma emergente. El contenido de los lineamientos se enfoca en los aspectos a cumplir para ejecutar seis actividades:

1. Recolección de sargazo en alta mar.
2. Contención del sargazo en zonas marinas cercanas a la costa.
3. Retiro de sargazo en las barreras de contención.
4. Remoción de sargazo de la playa.
5. Manejo y disposición final de sargazo.
6. Campamentos tortugueros y zonas de anidación.

El principal inconveniente de las actividades antes mencionadas es que sus objetivos se enfocan en mantener en buenas condiciones las playas para uso turístico y evitar afecciones a las anidaciones de tortugas o a los mismos ejemplares que se puedan localizar en el sargazo. En las actividades se menciona que los principales mecanismos de recolección del sargazo inician con barreras físicas de contención y el uso de maquinaria sobre las playas para recolectarlo. Lamentablemente la implementación de estos lineamientos no cubre de manera extensa una identificación del sargazo como residuo, su estrategia de recolección y, por tanto, las condiciones ideales para su disposición final o aprovechamiento.

Para lograr establecer los mecanismos más acertados sobre el manejo y gestión del sargazo es necesario tomar en cuenta que una vez que es retirado del océano se descompone en unos pocos días o en hasta una semana produciendo un olor fétido (Walsh, 2019).

Si se llegan a establecer las condiciones que hacen un residuo al sargazo, el siguiente objetivo es identificar a qué jurisdicción corresponde la responsabilidad de su manejo y esto depende de la zona en que se ubique el sargazo; es decir, el sargazo flotando en el océano se considera flora en su hábitat, incluso en los lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe mexicano y el Golfo de México, en su apartado H, numeral 84, dice explícitamente que: “para todas aquellas actividades que requieran recolectar el sargazo en fresco y en estado flotante, ya sea en mar abierto o cercano a la costa, debe ser considerado como un recurso pesquero y las actividades de recolección se deberán apegar a la normatividad vigente aplicable en materia de recursos pesqueros”, para este caso la atribución o responsabilidad sobre el manejo del sargazo es federal debido a que el sargazo se aproxima a las costas y flota sobre la zona marítima de México. No obstante, al arribar a las playas y depositarse sobre la arena en el territorio se considera entonces un residuo de manejo especial (RME) de tipo orgánico por su composición y estructura.

El fundamento de considerarlo un RME es principalmente por su característica predominante de producirse un alto volumen, además de no cumplir con características de un residuo sólido urbano (RSU) o un residuo peligroso (RP) de acuerdo con lo que indica la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, LGPGIR, Art. 5º, fracción xxx (2018). La atribución correspondiente a este tipo de residuo es estatal, y aunque aún no se cuenta con leyes, reglamentos o normativas exclusivas de nueva cuenta los lineamientos técnicos y de la gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe mexicano y el Golfo de México en el inciso “H”, punto 85, menciona que: “para todas actividades que requieran colectar sargazo en estado de descomposición en la costa, barreras de contención, sitios de transferencia y/o disposición final, éste deberá ser considerado como residuo de manejo especial susceptible de ser valorizado en apego a la normatividad aplicable”. Al ser considerado un RME es un residuo que se encuentra sujeto a un Plan de Manejo de Residuos, esto de acuerdo con el Art. 5º, fracción III de la LGPGIR (2018), fracción donde se menciona que: “los residuos generados por las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, incluyendo los residuos de los insumos utilizados en esas actividades”.

Bajo las consideraciones antes descritas es que se puede iniciar con un ejercicio de clasificación del sargazo, sin embargo, esto demuestra que es imperante la necesidad de caracterizarlo y conocer más sobre sus propiedades, para con ello estipular normas, leyes o reglamentos que aborden el tema del sargazo de manera exclusiva con cobertura de su clasificación, atribuciones, manejo, gestión, disposición final o el desarrollo de alternativas para su aprovechamiento.

Una vez abordada la necesidad de establecer también un plan de manejo de residuos para el sargazo, describamos su definición de acuerdo con el art. 5º, fracción XXI de la LGPGIR (2018), donde se indica que es un “instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos específicos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, con fundamento en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos, diseñado bajo los principios de responsabilidad compartida y manejo integral, que considera el conjunto de acciones, procedimientos y medios viables e involucra a productores, importadores, exportadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, usuarios de subproductos y grandes generadores de residuos, según corresponda, así como a los tres niveles de gobierno”. Como la definición lo indica, generar un plan de manejo del sargazo incluiría una serie de aspectos integrales que buscan involucrar a todas las figuras afectadas y responsables también por la problemática que genera la presencia abundante del sargazo; esto enfocado a la minimización de impactos negativos que este provoca, pero mediante los mecanismos o estrategias adecuadas y precisas para su recolección, manejo, disposición final o alternativas de aprovechamiento, que estén orientadas a una serie de objetivos claros que se establezcan en el plan de manejo.

Abordemos ahora cuáles son algunos de los avances en las propuestas del uso y aprovechamiento del sargazo en México que han sido difundidos por fuentes de noticieros e información nacional e internacional que mencionan el uso y aprovechamiento del sargazo para la elaboración de libretas, ecoladrillos, elaboración de cocteles gourmet, creación de fertilizantes caseros, elaboración de suelas para tenis e incluso producción de pieles sintéticas orgánicas y cremas cosméticas (Arce, 2019). Aunque ya existen esta serie de iniciativas que buscan aprovechar el sargazo, su industrialización y

comercialización ha quedado inconclusa a causa de la baja rentabilidad industrial, falta de coordinación y regulación (López et al., 2023), así como el paso esencial de su caracterización para conocer sus propiedades físico químicas, debido a que no solo posee contenidos benéficos, sino que también se ha documentado la presencia de concentraciones de elementos que incluyen metales pesados como la cantidad de arsénico (As) reportada en el trabajo de Rodríguez-Martínez et al. (2020), quienes detectaron 55,59 y 123 ppm del metal tóxico; mientras que Ortega-Flores et al. (2022) encontraron desde  $48.24 \pm 3.35$  mg/Kg de As hasta  $101.40 \pm 9.12$  mg/Kg de As en la especie de *S. fluitans* recolectada en Quintana Roo.

### **La producción de biogás a partir del RME de sargazo como una alternativa de manejo**

Una opción de aprovechamiento del sargazo es emplearlo como un sustrato para la producción de biogás, que es el producto final de un proceso denominado digestión anaerobia, el cual se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, es de tipo biológico, complejo, degradativo y por acción de microorganismos en los materiales orgánicos o biomasa de un sustrato (residuos animales y/o vegetales) son convertidos en biogás, este se compone de una mezcla de gases de metano (50-75 vol. %) y de dióxido de carbono (25-50 vol. %), aunque también contiene pequeñas cantidades de hidrógeno (H), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), amoníaco (NH<sub>3</sub>) y otros gases traza (FAO, 2011; Mutz et al., 2017). En este proceso anaeróbico también se produce digestato, una mezcla acuosa de materiales sólidos rica en nutrientes, minerales y compuestos biológicamente activos, que puede ser utilizado como fertilizante o mejorador de suelos (Ramos, 2014).

Diversos investigadores han procesado la biomasa de algunas especies de algas vía digestión anaerobia, los estudios que lograron producciones elevadas con algas del mismo género o especie similares a las que llegan a Quintana Roo, fueron los de Olivera et al. (2014), quienes lograron producir hasta 119 y 380 L CH<sub>4</sub>/kg sv con *Sargassum sp.* como sustrato; mientras que Thompson et al. (2021) produjeron  $292.18 \pm 8.70$  CH<sub>4</sub> ml/gVS con

*Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*; y Tapia et al. (2018) lograron generar 104 L CH<sub>4</sub>/kg sv con *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*.

En este contexto, el presente trabajo planteó la evaluación del sargazo como sustrato en codigestión anaerobia con la FORSU (Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos) con la finalidad de comprobar si las macroalgas del género *Sargassum* spp. que arriban al Caribe Mexicano en co-digestión anaerobia con la FORSU aumentan la producción de biogás comparado con la digestión anaerobia del *Sargassum* spp. como único sustrato.

## Metodología

### Recolección de muestras de sargazo

Se seleccionó la playa El niño, ubicada en el municipio de Puerto Juárez en Quintana Roo (México), por ser de libre acceso (no pertenecía a ningún hotel) y sin interferencias de limpieza continua de sargazo en la zona; además de ser una zona muy popular de concurrencia familiar cercana al embarcadero del Ferri. El muestreo se realizó en julio 2020, de acuerdo con lo descrito en la norma NADF-020-AMBT-2011, en específico obedeciendo al punto 7.1 de la metodología de muestreo para así conseguir una muestra homogénea derivada de submuestras. Esta norma ambiental se fundamenta en la NMX-AA-15-1985 para el método de cuarteo, pero orientada a los residuos orgánicos, tal como lo es el sargazo al ser de origen vegetal y que al acumularse en las playas se convierte en un residuo orgánico de gran volumen. Las mismas normas se aplicaron para la recolección de la FORSU proveniente de pilas de la planta de composta en Bordo poniente, Ciudad de México, y para el caso del inóculo su toma fue directamente del cárcamo de lixiviación de la pila de composta muestreada.

Se recolectaron muestras compuestas homogéneas derivadas de submuestras o muestras individuales, que fueron recolectadas en dos medios: sobre la playa y dentro del mar; además, en ambos casos se realizó a la mitad de las muestras individuales de cada medio un lavado con agua de mar en el sitio de muestreo. Tanto la preservación del sargazo, así como de la del FORSU, fue en bolsas con cierre hermético, del material de

polietileno; las cuales se conservaron a  $-40^{\circ}\text{C}$  en ultracongelador; mientras que el inóculo se recolectó en frascos de 1L de plástico y se mantuvieron a  $55^{\circ}\text{C}$  en una incubadora estática.

### **Parámetros fisicoquímicos del sargazo**

Se considera que la digestión anaeróbica del sargazo se realizaría bajo condiciones de prelavado y en codigestión con FORSU y utiliza como inóculo lixiviado proveniente de la planta de composta de Bordo Poniente de la Ciudad de México, se evaluaron algunos parámetros físicos y químicos del sargazo, FORSU y del inóculo. Los parámetros valorados se describen en la tabla 1. Dentro de las determinaciones antes mencionadas la que fue el eje principal para el monitoreo de la producción de biogás fue la del PBM basada en el método de Angelidaki et al. (2009), que emplea controles con un blanco positivo de inóculo y celulosa, así como un blanco negativo con inóculo y agua. Tanto para los controles y las muestras a procesadas el método se realizó por duplicado para cada mezcla, para así analizar las tendencias de producción de biogás y metano.

### **Prueba de digestión anaeróbica**

A escala laboratorio, el proceso de digestión anaerobia se monitorea con la prueba del Potencial Bioquímico de Metanización (PBM), para verificar qué cantidad y calidad de biogás producen nuevos sustratos en el proceso; es así como mediante una investigación previa se estudian las particularidades que puede presentar el proceso, debido a que buena parte del desarrollo de este se condiciona por el sustrato (Arhoun, 2017).



Tabla 1. *Métodos de prueba de parámetros fisicoquímicos para caracterización del *Sargassum* spp.*

<i>Parámetro</i>	<i>Método de prueba propuesto</i>	<i>Referencia</i>
pH	Medición potenciométrica (suspensión acuosa)	Sadzawka et al., 2005.
Conductividad eléctrica	Medición conductimétrica (suspensión acuosa)	Sadzawka et al., 2005.
Porcentaje de humedad	Gravimetría y secado	Sadzawka et al., 2005.
Potencial de óxido reducción (ORP)	Medición directa a muestra con extracto en estado líquido	Sin referencia, método predefinido por equipo.
Sólidos totales	Calcinación en mufla	Sadzawka et al., 2005.
Sólidos volátiles (materia orgánica, para carbono orgánico)	Pérdida por calcinación a 550° C	Sadzawka et al., 2005.
Potencial bioquímico de metanización (PBM)	Volumen de gas generado	Angelidaki et al., 2009.
Lignina	Digestión H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> al 72 %	Modificación estandarizada norma TAPPI-T 222 om-02.
Poder calorífico superior e inferior	Método de prueba para RSM bomba calorimétrica	NMX-AA-33-1985.
Determinación de metales pesados	Digestión de muestras por calentamiento en placa	Método EPA 3052.

Fuente: los datos presentados en esta tabla fueron elaborados a partir de la información de los autores citados en la última columna.

El montaje de las pruebas consistió en un set de experimentos identificados como A, B y D en viales de 125 ml, con un volumen de operación de 60 ml y espacio libre de cabeza de 65 ml para almacén del biogás producido y con ello se evitó que se disolviera en el digestato. Los viales se sellaron con septas de goma y anillo de aluminio para lograr la posterior extracción de muestra de biogás y la purga de este. Las condiciones anaerobias se propiciaron con una purga en la preparación con gas Helio (He).

El proceso de codigestión anaerobia se llevó a cabo en la incubadora Lab Tech LSi-3016 a 55° C (digestión de tipo termófila (Vanegas, 2015)) y una agitación constante de 70 rpm por un periodo de 35 días; la digestión fue también de tipo seca debido a que la concentración de materia sólida es mayor al 20–40 % de sv (Angelonidi y Smith, 2015); con 20–40 % sv (Massi, 2012). En este tipo de digestiones se suelen emplear reactores completamente mezclados y por lotes. Se reporta que esta serie de condiciones hace el proceso más rápido (Fernández et al., 2010). Es relevante mencionar que para

el montaje del set de experimentos las relaciones de sólidos volátiles (sv) elegidas para los sustratos (sargazo y FORSU) fueron de 2:1, 1:2 y 1:1; esto de acuerdo con Esposito et al. (2012) y Raposo et al. (2011). Las cantidades de sustratos e inóculo agregadas a los viales fueron según los sv de cada sustrato, estos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Promedio de sólidos volátiles añadidos en el set de experimentos de los sustratos e inóculo

Prueba	Promedio % SV añadido	g SV añadidos de sustratos(s)
Blanco positivo	99.7	0.5
Blanco negativo	44.1	-
FORSU	90.4	0.6
SM	91.2	0.2
SML	77.5	0.5
SM_FO 1:2	73.6	0.9
SML_FO 1:2	72.4 ± 14.2	0.8 ± 0.2

\*Nota: Los valores de la tabla 2 que presentan desviación estándar se lograron realizar por triplicado, el resto por duplicado.

Nomenclatura:

SM = Sargazo sobre el mar sin prelavado

SML = Sargazo sobre el mar con prelavado

FORSU = Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

SM:FO 1:2 = Sargazo sobre el mar sin prelavado y FORSU relación 1:2 SV

SML:FO 1:2 = Sargazo sobre el mar con prelavado y FORSU relación 1:2 SV

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

Cada tercer día se midió la cantidad de biogás generado por desplazamiento de columna y la composición de biogás mediante inyecciones de muestra en el cromatógrafo de gases Autosystem Perkin Elmer, equipado con un detector de conductividad térmica (TSD) y una columna empacada de 12' de largo, 1/8" de diámetro externo y 0.08" de diámetro interno, soporte de acero inoxidable y material de empaque Porapak QS (Alltech), las medidas se visualizaron a través del *software* Clarity Chromatography SW en cromatogramas con 3 picos que representan el porcentaje de N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. El gas de arrastre fue el helio (He) grado cromatografía (Praxair); para la inyección de muestras se empleó una jeringa especial para gas de precisión (Vici Preciscion Lok).

## Resultados y discusión

### Resultados de la caracterización fisicoquímica de los sustratos e inóculo

Los resultados de los parámetros de la caracterización de las distintas muestras del sargazo que fueron probadas, así como de la FORSU y del lixiviado de la planta de composta que se utilizó como inóculo se resumen en la tabla 3; en ella se presentan los valores promedio para cada parámetro, en el caso del sargazo se presentan resultados en las condiciones de recolección sobre el mar y sobre la playa; en ambos casos con y sin prelavado; esto para verificar la influencia de la presencia de sal y arena en el proceso. De acuerdo con Cheng (2018) el pH óptimo para el desarrollo de los principales microorganismos en el proceso de digestión llamadas Archeas metanogénicas, es en un pH de 6.5-8.0; por lo que los datos de la tabla 3 cubren el rango permitido, a excepción de la FORSU, cuyo valor es inferior a 6.0. El resto de los valores de pH en los sustratos e inóculo indican condiciones básicas; aunque el sargazo recolectado en el mar sin pre-lavado (SM) y la FORSU registraron valores ácidos que influyen generalmente en el proceso al inhibir la producción de biogás, en especial por la FORSU; un beneficio de la codigestión es equilibrar estos niveles de pH.

En relación al ORP, este debe monitorearse durante el proceso, debido a que es un parámetro que verifica las condiciones en que se desarrollan las bacterias metanogénicas y de ello depende su baja velocidad de crecimiento y los estrictos requerimientos de bajo potencial redox que deben oscilar en los -300 mV (Lorenzo y Obaya, 2005). La conductividad por su lado expresa numéricamente la capacidad de la muestra para transportar una corriente eléctrica, es decir, la presencia de iones, en este caso las sales en el sargazo prelavado con agua de mar mostró un valor superior que el del sargazo sin prelavado.

La cantidad de los sólidos volátiles (sv) equivale a la materia orgánica susceptible a degradación en el proceso de digestión anaerobia para ser transformada a metano. Los resultados arrojaron que hubo mayor variación entre los tipos de sargazo para los valores de sv y st (sólidos totales). Las variaciones de estos parámetros se notaron aún más en el inóculo recolec-

tado en septiembre de 2020 y febrero de 2021, lo cual se atribuye a la variación estacional, ya que en septiembre fue época de lluvia y se presenta una dilución del lixiviado, en comparación de febrero de 2021 donde ya era época seca. De este par de parámetros se desprende la relación entre  $SV/ST$  que equivale al porcentaje de materia orgánica susceptible a degradación en el proceso, estas cantidades muestran valores superiores a 80 % para los sustratos que fueron sometidos al proceso.

Otro dato que se puede conocer es el de la cantidad de cenizas de los sustratos mediante el valor de los  $ST$ , es decir, lo equivalente al material recalcitrante que no es posible degradar en el proceso. Los valores de la tabla 3 son elevados para el sargazo, en particular a pesar de que hubo producción de biogás con contenido de metano.

El dato de lignina en el sargazo con prelavado registró un valor ligeramente menor al de sargazo sin prelavado, el único dato comparativo fue el realizado por Tapia et al. (2018), que obtuvieron un 15.6 % de lignina, valor superado por casi el doble para el sargazo sin prelavado y por un 10 % para el que sí tuvo prelavado.

En cuanto el valor de  $PCS$  (poder calorífico superior) y  $PCI$  (poder calorífico inferior) en las muestras del sargazo recolectado en el mar sin prelavado se encontró un  $PCI$  de  $1812.119 \pm 37.561$  cal/g y para el sargazo recolectado en el mar sin prelavado  $2036.896 \pm 4.07$  cal/g cantidad que representa cerca de 2000 cal/g menos que lo reportado por López-Sosa et al. (2020) quienes reportaron un valor de  $PCI$  de la mezcla de *Sargassum* spp. de entre 3224.421 cal/g y 3296.075 cal/g. Estos valores fueron de utilidad para poderlos comparar con el  $PCI$  o poder calorífico neto, que de acuerdo con la NMX-AA-033-1985 es “el calor producido por la combustión de una cantidad unitaria de combustible sólido en condiciones constantes de presión y condiciones específicas tales que toda el agua de los productos permanezca en forma de vapor”. Sin embargo, para tomar en cuenta la termovalorización de los residuos de esta macroalga se deben considerar factores como la concentración de metales en el sargazo (los valores de metales pesados del sargazo se mostrarán más adelante).

Tabla 3. Resultados de parámetros físicos y químicos de sargazo, FORSU e inóculo

Parámetro	SM	SML	SP	SPL	Inóculo septiembre 2020	Inóculo febrero 2021	FORSU
pH	6.9 ± 0.1	7.4 ± 0.1	7.9 ± 0.1	7.4 ± 0.2	8.9 ± 0.01	7.71 ± 0.01	4.47 ± 0.11
Conductividad (μS/cm)	55946.7 ± 1422.9	61213.3 ± 2294.5	46466.7 ± 3556.7	1467.3 ± 77.5	32160 ± 576.9	48400 ± 2593.5	43120 ± 7389.8
ORP (mV)	66.8 ± 2.3	54.8 ± 1	39.7 ± 3.8	35.5 ± 2.7	-468.1 ± 6.1	-482.1 ± 74.5	147.6 ± 5.0
% humedad	22.3 ± 0.9	22.0 ± 0.04	22.6 ± 0.8	17.8 ± 0.4	97.4 ± 0.1	96.3 ± 0.1	77.9 ± 2.4
ST (g/kg)	801.1 ± 10.6	546.5 ± 404.6	774 ± 8.4	822.2 ± 4	26.1 ± 1.1	37.0 ± 0.6	221 ± 23.9
SV (g/kg)	730.7 ± 13.3	484 ± 358.2	659.1 ± 12.7	749.9 ± 7.5	8.7 ± 0.2	16.3 ± 0.5	201.7 ± 23.6
SV/ST (%)	91.2 ± 0.6	88.7 ± 0.4	85.1 ± 0.8	91.2 ± 0.6	33.2 ± 0.5	43.9 ± 0.8	91.2 ± 1.1
Lignina (%)	30 ± 1.7	26 ± 0.2	-	-	-	-	-
Poder calorífico superior (cal/g)	2043.9 ± 29.8	2210.1 ± 5	-	-	-	-	-
Poder calorífico inferior (cal/g)	1812.1 ± 37.6	2039.9 ± 4.1	-	-	-	-	-

Nomenclatura:

SM = Sargazo sobre el mar sin prelavado

SML = Sargazo sobre el mar con prelavado

SP = Sargazo sobre la playa sin lavado

SPL = Sargazo sobre la playa con prelavado

FORSU = Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

**Resultados del potencial bioquímico de metanización (PBM).** Si bien el método original de PBM indica que el proceso debería ser de al menos 30 días, los resultados que se muestran fueron de 35 días, esto debido a que el comportamiento de la evaluación del sargazo como cosustrato dio mejores niveles de producción de biogás hacia el día 20. Los resultados se muestran en condiciones estándar de operación, es decir, se considera la presión de 0.77 atm en la Ciudad de México (CDMX) y la condición de operación a una temperatura de 55°C, equivalente a 328 K.

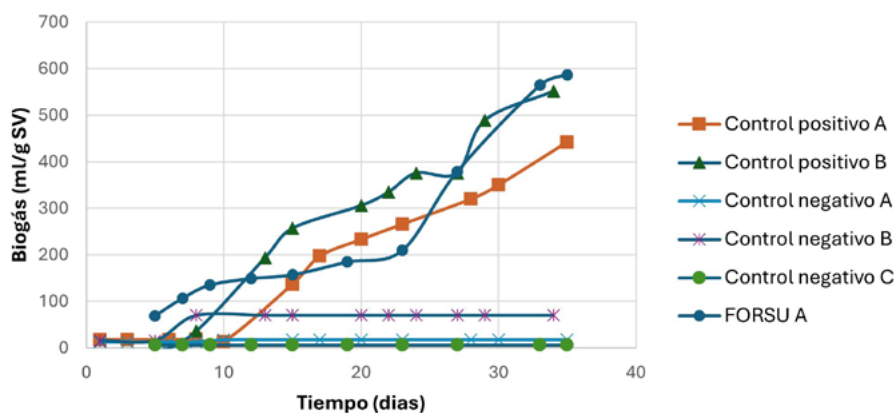
La mayor parte de los resultados fueron realizados por duplicado, solo algunos se lograron por triplicado, se reportó el volumen acumulado durante los días de monitoreo para así poder observar la tendencia del rendimiento de biogás y metano para los controles positivos, negativos, el sargazo como único sustrato, la FORSU y los esquemas de codigestión.

Las figuras que muestran las tendencias tienen el mismo rango numérico para el volumen de biogás (700 ml/g sv) y metano (350 ml/g sv) gene-

rados, esto con la finalidad de poder comparar las diversas tendencias de los diferentes sustratos.

A continuación, en la figura 1 se muestran los resultados de la evolución de la producción de biogás únicamente de la FORSU, lo que demuestra que su producción es superior en comparación con la producción de los controles negativos, como referente se observan las producciones de los controles positivos que contienen celulosa. Los resultados provienen de un set de experimentos identificados como A, B, y C, de los cuales los mejores resultados son los que se muestran en las tendencias. La producción de los controles positivos y de la FORSU se elevan hacia la mitad del proceso en el día 15.

Figura 1. Tendencia de la producción de biogás en los controles y la FORSU



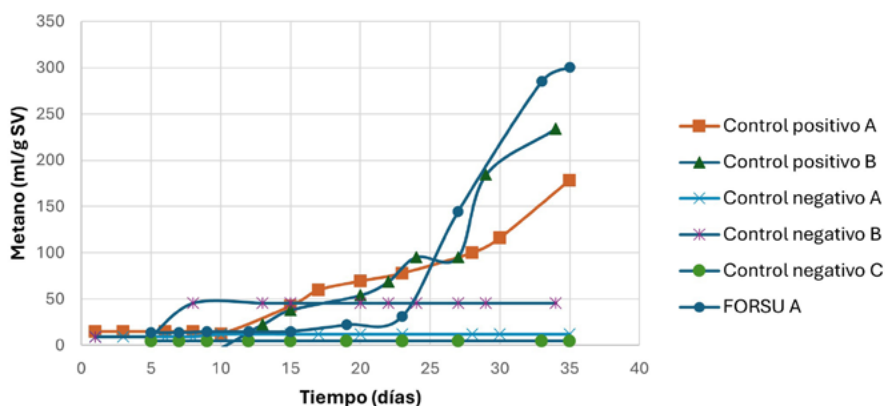
Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

Respecto a la concentración de metano, en la figura 2 se visualiza mayor producción en la FORSU que en los controles positivos y los controles negativos es la mayor tasa de producción de metano entre el día 17 y el día 20.

La ejecución de los experimentos demostró que la FORSU tiende a una producción de biogás de hasta 586.82 de los cuales 300.30 son lo que equivale a un 51.17 % de  $\text{CH}_4$ . Al comparar estos valores con reportes de otros autores que realizaron sus experimentos con el inóculo y FORSU procedentes del mismo origen (la planta de composta de Bordo Poniente en la Ciudad de México), podemos observar que la tendencia del volumen de

producción de biogás y metano de esta investigación son similares para la FORSU, principalmente con lo reportado por Gállego (2021), quién reportó 472.2 y 290.9 mientras que su control positivo es también muy similar al que reportamos en este trabajo con  $316.3 \pm 58.92$  y  $166.2 \pm 16.0$ ; esto en un periodo de 42 días.

Figura 2. Tendencia de la producción de metano en los controles y la FORSU



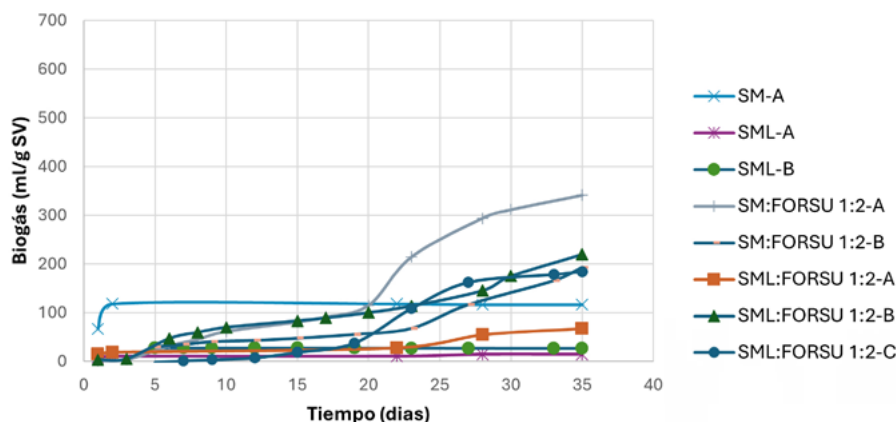
Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

En cuanto al control negativo es Salcedo (2017) quien reporta un valor muy similar al que se encontró en este trabajo de investigación con 29.3 en un periodo de 20 días. En lo que respecta al trabajo desarrollado por Sánchez (2015) tenemos que considerar que monitoreó su proceso en casi el doble de tiempo que lo realizado en este trabajo, por lo que toma sentido que su rendimiento de metano reportado tenga una cantidad de casi del triple de volumen en comparación al volumen que reportamos en este trabajo, con un valor de 1080.1 en 56 días.

En la comparativa de la producción de biogás con el sargazo como único sustrato y los distintos esquemas de codigestión se puede observar en la figura 3 que la producción de biogás del sargazo como único sustrato sin enjuague (SM) era baja en los primeros 5 días del proceso y, en general, se potencializó a partir del día 20. Para el caso de las codigestiones el sargazo

sin prelavado con la FORSU relación 1:2 (SM:FO 1:2), una de las réplicas es la que más producción de biogás mostró.

Figura 3. Tendencia de la producción de biogás en el sargazo y co-digestiones sargazo-FORSU



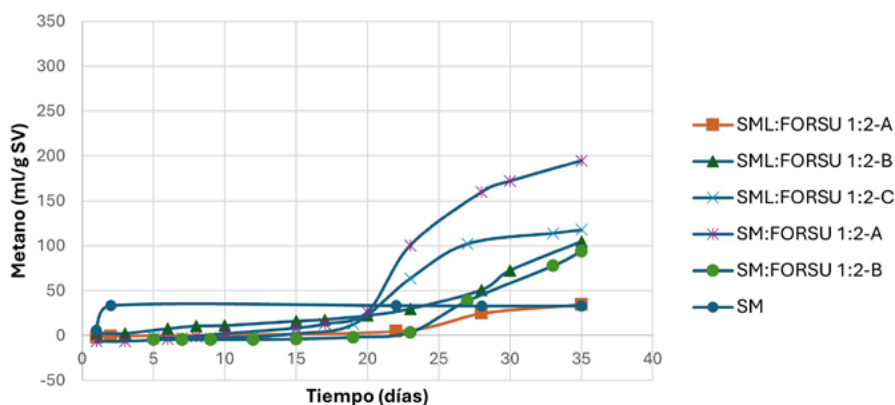
Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

En la figura 4 se muestra la tendencia, pero de la producción de metano para los mismos esquemas de sargazo como único sustrato y en codigestión mostró mejor producción de metano a una de las réplicas de sargazo sin prelavado (SM:FORSU) relación 1:2 sv, la cual se elevó desde el día 20 en adelante, hasta casi alcanzar 200, seguido de dos réplicas de sargazo prelavado (SML:FORSU) relación 1:2.

Las tendencias visualizadas en esta figura indican que la producción de metano coincide con la de biogás en el día 20 del proceso y que a diferencia de las tendencias de la FORSU, hubo una mejora en el contenido de metano hasta de un 60 % para las codigestiones.



Figura 4. *Tendencia de la producción de metano en sargazo y la co-digestión de sargazo-FORSU*



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

Es necesario mejorar las réplicas de los esquemas de codigestión con sargazo prelavado y sin prelarvar para consolidar qué esquema es el que ofrece el mejor rendimiento de biogás y metano. Lo que si fue observable es que los esquemas de codigestión muestran mejor producción de biogás y metano a comparación del sargazo “crudo” como único sustrato, llegando a incrementar la calidad del biogás hasta 10 % más metano con respecto a la FORSU como único sustrato. En todas las tendencias analizadas se observó que el incremento de producción de biogás y metano con el esquema de codigestión se retarda, a comparación del incremento de producción de la FORSU como único sustrato.

### Calidad del digestato

El digestato es otro producto de interés del proceso de codigestión anaerobia, los mejores resultados de producción de biogás y metano para cada sustrato solo y en las diferentes proporciones de sv se compararon conforme a la NADF-020-AMBT-2011, esta norma originalmente es para clasificación de composta de acuerdo con su calidad; sin embargo, es aplicable también para

deducir la calidad del digestato y evaluar la viabilidad de emplearlo como mejorados de suelos o fertilizante. Los resultados de los parámetros analizados se observan en la tabla 4.

Tabla 4. *Parámetros determinados para los digestatos del set de experimentos analizados*

<i>Prueba</i>	<i>pH</i>	<i>Conductividad (μS/cm)</i>	<i>ORP (mV)</i>	<i>%H</i>	<i>SV (g/kg)</i>	<i>ST (g/kg)</i>	<i>% SV/ST</i>
Control positivo	8.2 ± 0.4	32660 ± 2671	-68.6	96.8 ± 0.8	9.7 ± 2.8	30.8 ± 6.5	30.3 ± 3.2
Control negativo	9.6 ± 0.3	25000 ± 1215.1	-108.8	97.6 ± 0.1	1.69	25.9 ± 3.1	17.1 ± 7
FORSU	8.2	33280	43	97.1	8.90	28.9	30.8
SM	9.4	22180	-84.5	97.9	4.21	20.9	19.1
SML	9.4	29000 ± 1216.2	-77	97.7	7.31	29.0	24.5
SM:FO 1:2	8.3	33800 ± 3479	-53.5	97.2	9.30	32.3	28.1
SML:FORSU 1:2	8.4 ± 0.4	31146.7 ± 4320.7	-9.3	97.1 ± 0.7	7.9 ± 2.7	29.0 ± 6.6	26.8 ± 3.2

Nota: Los valores de la tabla que presentan desviación estándar se lograron realizar por triplicado, el resto únicamente por duplicado.

Nomenclatura:

SM = Sargazo sobre el mar sin prelavado

SML = Sargazo sobre el mar con prelavado

FORSU = Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

SM:FO 1:2 = Sargazo sobre el mar sin prelavado y FORSU relación 1:2 SV

SML:FO 1:2 = Sargazo sobre el mar con prelavado y FORSU relación 1:2 SV

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

Al compararlos con la NADF-020-AMBT-2011, todos los valores de %H del digestato producto del esquema de codigestión muestran que se superó el valor sugerido para una composta, es un valor esperado debido a que el digestato es un producto semisólido que se compone en su mayoría de agua; no obstante, obedeciendo a la clasificación de norma, este entra en el rango para composta tipo C (%H de 25-45 %). En cuanto a la mayoría de los valores de pH registrados (superiores a 8.0), estos entran en la clasificación de composta de calidad B o C, y para la conductividad eléctrica se observó que es el único parámetro que entra en los valores de la composta tipo A con lecturas <4 dS/m (400 000 μS/cm) en todas las muestras. Para el caso de la materia orgánica (%sv) los valores fueron inferiores al 20 % lo que entra en la clasificación de composta de tipo A; a su vez este parámetro es un indicador de que la materia orgánica se redujo durante el proceso de codigestión.

Tabla 5. Concentraciones de metales pesados detectados en sustratos y digestatos del proceso de co-digestión anaerobia

Elemento	Sustratos (mg/kg) base seca			Digestatos (mg/kg) base seca							NADF-AMBT-020-2011 (mg/kg) base seca		
Muestra	SM	SME	FORSU	Control positivo	Control negativo	FORSU	SM	SM:FO 1:2	SML:FO 1:2	Control [As]	Nivel 1-tipo A	Nivel 2-tipo B	Nivel 3-tipo C
Cu	2.2	0.8	9.9	4.2	4.2	11.4	4.1	7.795	7.3	---	70	150	400-500
Cd	1.9	2.0	0.1	2.2	2.5	2.7	1.8	2.885	2.8	---	0.7	1	3
Cr	0	0	0	2.5	2.2	3	2.4	1.725	1.5	---	70	70	250
Ni	5.6	4.9	0	14.0	15.2	16.2	14.4	16.33	15.3	---	35	60	100
Pb	13.8	16.9	3.8	21	23.2	24.8	18.6	24.715	24.4	---	45	120	200
Zn	10.5	11.5	38.9	36.2	38.2	59.4	46.0	33.8	38.9	5.6	200	500	1200-1800
Hg	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0	0		0.4	0.7	3
As	<b>22.6</b>	<b>20.3</b>	0.1	1.7	<b>2.2</b>	<b>2.5</b>	<b>3.8</b>	<b>5.6</b>	<b>8.8</b>	11.6	0.1	0.7	2

Nota: Valores determinados del set de experimentos analizados por duplicado para sustratos y digestatos, a excepción de la FORSU y control negativo.

Nomenclatura:

SM = Sargazo sobre el mar sin pre-lavado

SML = Sargazo sobre el mar con pre-lavado

FORSU = Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

SM:FO 1:2 = Sargazo sobre el mar sin pre-lavado y FORSU relación 1:2 SV

SML:FO 1:2 = Sargazo sobre el mar con pre-lavado y FORSU relación 1:2 SV

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

Un análisis conjunto del tipo de composta en que entraron la mayoría de los parámetros ubica a los digestatos como composta tipo C, cuyo uso es recomendado para paisaje, áreas verdes urbanas y reforestación. Pese a que se logró un ejercicio de clasificación del digestato, es importante mencionar que puede complementarse al añadir los parámetros de carbono total, nitrógeno total, relación C/N, macronutrientes (NPK), fitotoxicidad (IG) y las concentraciones máximas de elementos traza en mg/kg base seca según el tipo de composta en los que incluye As, Cd, Cr total, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn.

En la tabla 5 se muestran los resultados de las concentraciones de Cu, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn, Hg y As que se determinaron para los sustratos (antes del proceso de digestión) y para los distintos digestatos. La técnica empleada fue espectrofotometría de absorción atómica.

La mayoría de los valores obtenidos no supera las concentraciones en mg/kg base seca del nivel de composta 1, tipo A; a excepción del Cd, sus

valores entran en su mayoría en el nivel 2, tipo B de composta. Del análisis de estos elementos el hallazgo más relevante es el elemento del arsénico (As), dónde los valores más elevados los registró el sargazo con y sin prelavado, esto antes de someterlos al proceso de codigestión. Se observó que la concentración disminuyó posterior al proceso de codigestión; no obstante, las lecturas aún excedieron la concentración de 2 mg/kg de As en base seca. El hallazgo de concentraciones de As coincide con los trabajos de Thompson et al. (2021) y López-Sosa et al. (2020), quienes también evaluaron el sargazo como fertilizante y alimento para ganado, coincidiendo en que el As es elevando para emplearlo como fertilizante en cultivos de alimentos y como alimento para ganado al implicar un riesgo a la salud humana por consumirlos. La mayoría de los valores de los digestatos entraron en el nivel de composta 3, tipo C, para uso recomendado en paisaje, áreas verdes urbanas y reforestación.

## Conclusiones

Las tendencias de los rendimientos de biogás y metano en las pruebas de PBM indican que hubo producción a los 15 días del proceso en los controles positivos y la FORSU. Para el caso del sargazo como único sustrato y los esquemas de codigestión 1:2 sv se observó un retraso en la producción de biogás y metano potencializándose hacia el día 20 del proceso.

El comparativo del sargazo como único sustrato y el esquema de codigestión mostró que la tendencia del rendimiento de biogás y metano mejora FORSU relación 1:2 sv añadidos, el que superó por 10 % la tendencia de producción de metano en comparación de la FORSU como único sustrato. En lo que respecta al análisis de los sustratos con la NADF-AMBT-020-2011 se destacó que, en las concentraciones del contenido de metales pesados, el sargazo como sustrato supera en contenido de arsénico.

La calidad de digestato conforme a la NADF-AMBT-020-2011 permitió consolidar un fertilizante nivel 3, tipo C, para uso recomendado en paisaje, áreas verdes urbanas y reforestación, pero con una concentración que supera el límite máximo permisible (LMP) de la concentración de arsénico; sin embargo, aun con la presencia de este se registró producción de biogás y metano, generados por los microorganismos presentes en el inóculo. Se

infiere que la disminución de la concentración del arsénico posteriores al proceso fue un efecto de dilución por el mismo esquema de codigestión y el inóculo añadido. Aparentemente la presencia del arsénico en el sargazo pudo influir en la inhibición la producción de biogás y metano al usarlo como único sustrato y en las codigestiones, persistiendo el arsénico hasta su conversión a digestato, lo que representa un riesgo para los suelos y salud humana al emplearlo como fertilizante, ya que aun la concentración supera el valor del LMP de arsénico de 2 a 3 veces más.

## Referencias

- Lorenzo Acosta, Y. y Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos parte I. ICIDCA. *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XXXIX(1), 35-48.
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L. y Campos, J. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water, Science and Technology-WST*, 59(5), 927-934.
- Angelonidi, E. y Smith, S. (2015). A comparison of wet and dry anaerobic digestion processes for the treatment of municipal solid waste and food waste. *Water and Environment Journal*, 29(4), 549-557. doi:10.1111/wej.12130.
- Arce, J. (23 de junio de 2019). El sargazo, un mar de oportunidades. *El Sol de México*. <https://www.elsoldemexico.com.mx/doble-via/ecologia/sargazo-caribe-mexicano-reciclaje-zapatos-viviendas-cambio-climatico-3791920.html>
- Arhoun, B. (2017). *Digestión y co-digestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora* [Tesis doctoral. Universidad de Málaga]. Universidad de Málaga.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2016). *Method of test for holocellulose in wood*. ASTM. <http://www.astm.org/Standards/D1104.htm>
- Cheng, J. (Ed.). (2018). *Biomass to renewable energy processes*. Tylor and Francis.
- Environmental Protection Agency (1996). Test Method 3052: Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Based Matrices. (Revisión 0). <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3052.pdf>
- Espinosa, L. y Li, J. (2020). *El riesgo del sargazo para la economía y turismo de Quintana Roo y México*. BBVA.
- Esposito, G., Frunzo, L., Liotta, F., Panico, A. y Pirozzi, F. (2012). Bio-methane Potential tests to measure the biogas production from the digestion and co-digestion of complex organic substrates. *The open environmental Engineering Journal*, 5(2112), 5-8.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2011) *Manual de biogás*. FAO.

- Fernández, L., Álvarez, C., Sales, D. y Romero, L. (2010). Start-up of thermophilic–dry anaerobic digestion of OFMSW using adapted modified SEBAC inoculum. *Biore-source Technology*, 101(23), 9031–9039. doi:10.1016/j.biortech.2010.07.021
- Franks, J. S., Johnson, D. R. y Ko, D. S. (2016). Pelagic Sargassum in the tropical North Atlantic. *Gulf and Caribbean Research*, 27(1). SC6–SC11.
- Gállego, K. (2021). *Efecto de la bioaumentación en la generación de metano en un proceso de digestión anaerobia termófila de residuos orgánicos* [Tesis doctoral. Instituto Politécnico Nacional]. Instituto Politécnico Nacional.
- Mutz, D., Hengevoss, D., Hugl, C. y Gross, T. (2017). *Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos. Guía para los responsables de la toma de decisiones en países en vías de desarrollo y emergentes*. GLZ.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) de 2003. La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos, en el territorio nacional. 8 de octubre de 2003. DOF 08-05-2023.
- León, C. (2019). El sargazo a escena. *Salud Pública México*, 61(5), 701–703. <https://doi.org/10.21149/10870>
- López-Sosa, L. B., Alvarado-Flores, J. J., Corral-Huacuz, J. C., Aguilera-Mandujano, A., Rodríguez-Martínez, R. E., Guevara-Martínez, S. J., Alcaraz-Vera, J. V., Rutia-ga-Quíñones, J. G., Zárate-Medina, J., Ávalos-Rodríguez, M. L. y Morales-Máximo, M. (2020). A Prospective Study of the Exploitation of Pelagic *Sargassum* spp. as a Solid Biofuel Energy Source. *Applied Sciences*, 10(23), 8706. <https://doi.org/10.3390/app10238706>
- López González, I. E., Lucho Constantino, C. A. y López Pérez, P. A. (2023). La invasión de sargazo: de un problema ambiental a un área de oportunidad. *Tópicos De Investigación En Ciencias De La Tierra Y Materiales*, 10(10), 18–26.
- Massi, E. (2012). Anaerobic digestion. *Green Energy and Technology*, 47–63. doi:10.1007/978-1-4471-2369-9\_3
- Marks, L. M., Reed, D. C. y Obaza, A. K. (2017). Assessment of control methods for the invasive seaweed *Sargassum horneri* in California, USA. *Management of Biological Invasions*, 8(2), 205–213.
- Milledge, J. J. y Harvey, P. J. (2016). Golden tides: Problem or golden opportunity? The valorisation of sargassum from beach inundations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(3), 60.
- Milledge, J. J., Supattra, M., Arribas López, E. y Bartlett D. (2020). Sargassum inundations in Turks and Caicos: Methane potential and proximate, ultimate, lipid, amino acid, metal and metalloid analyses. *Energies*. 13(6), 1523. doi:10.3390/en13061523
- Muñoz, M., Tovar, L. y Gutiérrez, M. (2019). *Producción de biogás a partir de sargazo como una alternativa de manejo* [Tesis para obtener el grado de maestría]. Instituto Politécnico Nacional.

- NOAA's Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory [NOAA/AOML]. (2 de enero de 2018). *Tracking Marine Debris*. [www.aoml.noaa.gov/keynotes/keynotes\\_0118\\_marinedebris.html](http://www.aoml.noaa.gov/keynotes/keynotes_0118_marinedebris.html)
- Oliveira, J. V., Alves, M. M. y Costa J. C. (2014). Optimization of biogas production from *Sargassum* sp. using a design of experiments to assess the co-digestion with glycerol and waste frying oil. *Bioresource Technology*, 175, 480-485.
- Ortega-Flores, P. A., Serviere Zaragoza, E., De Anda-Montañez, J. A., Freile-Pelegrín, Y., Robledo, D. y Méndez-Rodríguez, L. C. (2022). Trace elements in pelagic *Sargassum* species in the Mexican Caribbean: Identification of key variables affecting arsenic accumulation in *S. fluitans*. *Science of the Total Environment*, 806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150657>
- Parra, I. (2022). *Ecoinnovación de productos para el turismo a partir de sargazo en las costas de Quintana Roo*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo.
- Ramos, J. (2014). *Producción de biogás a partir de biomasa de la microalga Scenedesmus sp. procedente de diferentes procesos*. [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Raposo Bejines, F., De la Rubia, M. y Fernández-Cegri, V. (2011). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode. An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 861-877.
- Robledo, D., Vázquez-Delfín, E., Freile-Pelegrín, Y., Vázquez-Elizondo, R. M., Qui-Minet, Z. N. y Salazar-Garibay, A. (2021) Challenges and Opportunities in Relation to *Sargassum* Events Along the Caribbean Sea. *Frontiers in Marine Science*, 8. doi: 0.3389/fmars.2021.699664
- Rooker, J., Turner, J. y Holt, S. A. (2006). Trophic ecology of *Sargassum*- associated fishes in the Gulf of Mexico determined from stable isotopes and fatty acids. *Marine Ecology Progress Series*, 313, 249-259. doi: 10.3354/maps313249. pp. .
- Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. y Jordán-Dahlgren, E. (2017). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe Mexican (2014-2015). En E. García-Mendoza, S. I. Quijano-Scheggia, A. Olivos-Ortiz y E. J. Núñez-Vázquez, *Florecimientos algales nocivos en México* (pp.352-365). CICESE.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Roy, P. D., Torrecano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S., Collado-Vides, L., García-Sánchez, M. y van Tussenbroek, B. I. (2020). Element concentrations in pelagic *Sargassum* along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019. *PeerJ*, 8, e8667 <https://doi.org/10.7717/peerj.8667>
- Sadzawka R., A., Carrasco R., M. A., Grez Z., R. y Mora G., M. de la L. (2005). *Métodos de análisis de compost*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Salcedo, D. (2017). *Valoración del digestato generado por la digestión anaerobia de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos de la Ciudad de México* [Tesis de maestría Instituto Politécnico Nacional]. Instituto Politécnico Nacional.
- Sánchez, D. (2015). *Evaluación del potencial bioquímico de metanización de residuos orgánicos, usando como inóculo dos tipos de lixiviados provenientes de la planta de*

- composta bordo poniente* [Tesis de maestría Instituto Politécnico Nacional]. Instituto Politécnico Nacional.
- Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. (2011). *Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-020-AMBT-2011, que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y/o distribuida en el Distrito Federal*.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-015-1985, que establece el método de cuarteo para residuos sólidos municipales y la obtención de especímenes para los análisis en el laboratorio*.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-033-1985 que especifica un método de prueba para determinar el poder calorífico superior de los residuos sólidos municipales, empleando una bomba calorimétrica de los diferentes tipos para planear y diseñar los sistemas adecuados de disposición final de los mismos*.
- Secretaría de Ecología y Medio Ambiente (SEMA)-Quintana Roo. (2018) Registro de actividades correspondientes a la limpieza costera. <http://sargazo2018.semaqroo.gob.mx/>.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2019). *Lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México*. SEMARNAT.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2021). *Lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México*. SEMARNAT. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/lineamientos-tecnicos-y-de-gestion-para-la-atencion-de-la-contingencia-ocasionada-por-sargazo-en-el-caribe-mexicano-y-el-golfo-de-mexico>.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2019). *Norma Mexicana NMX-AA-120-SCFI-2016 que establece los requisitos y especificaciones de sustentabilidad de calidad de playas*. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/nmx-120-playa-limpia-sustentable>
- Smetacek, V. y Zingone, A. (2013). Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, 504, 84-88.
- Tapia, R., Avila, J., Domínguez, J., Valero, D., Olguín, D., Pérez, D. y Alzate, L. (2018). Biological pretreatment of Mexican Caribbean macroalgae consortiums using Bm-2 strain (*Trametes hirsuta*) and its enzymatic broth to improve biomethane potential. *Energies*, 11(494), 2-11.
- TAPPI-Professional organization dedicated to the pulp and paper industries. (2006). Test method for acid-insoluble lignin in wood. T 222 om-02-02, 2-14.
- Thompson, T. M., Young, B. R. y Baroutian, S. (2021). Enhancing biogas production from caribbean pelagic *Sargassum* utilising hydrothermal pretreatment and anaerobic co-digestion with food waste. *Chemosphere*, 275, 130035. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130035>



- Uribe-Martínez, A., Guzmán-Ramírez, A., Arreguín-Sánchez, F. y Cuevas, E. (2020). El sargazo en el Caribe mexicano, revisión de una historia impensable. En E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, O. D. Cervantes Rosas, A. Espinoza-Tenorio, R. Silva Casarín, A. Ortega-Rubio, A. V. Botello y B. E. Vega-Serratos (eds.), *Gobernanza y Manejo de las Costas y Mares ante la Incertidumbre. Una Guía para Tomadores de Decisiones* (pp. 743-768). Universidad Autónoma de Campeche.
- Van Tussenbroek, B. I., Hernández Arana, H. A., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., González-Godoy, C. E., Barba-Santos, M. G., Vega-Zepeda, A., & Collado-Vides, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1-2), 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.057>
- Vanegas, C. (2015). *Biogas production from seaweed biomass: A biorefinery approach*. [Tesis de doctorado]. Institute of Technology Sligo.
- Walsh, K. (2019). *Examining the quality of a compost product derived from Sargassum (Sargassum fluitans and Sargassum natans)* [Tesis de maestría, Universidad del Estado de Texas]. Repositorio Institucional <https://digital.library.txstate.edu/bitstream/handle/10877/8143/WALSH-THESIS-2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B. y Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic *Sargassum* belt. *Science (New York, N.Y.)*, 365(6448), 83-87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>
- Witherington, B., Hiram, S. y Hardy, R. (2012). Young sea turtles of the pelagic *Sargassum*-dominated drift community: habitat use, population density, and threats. *Marine Ecology Progress Series*, 463, 1-22. <http://www.jstor.org/stable/24876034>



## 6. Diagnóstico básico para la gestión de residuos sólidos urbanos: cumplimiento de normativas locales y asignación de responsabilidades



JUANITA RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ\*

MARIANA ABIGAIL MUÑOZ DÍAZ\*\*

JUAN ALBERTO ALCÁNTARA CÁRDENAS\*\*\*

<https://doi.org/10.52501/cc.364.06>

### Resumen

La implementación de estrategias eficientes para un manejo integral de los residuos sólidos urbanos está basada en el diagnóstico de la generación de residuos que permiten identificar, cuantificar y evaluar los residuos sólidos generados por las actividades humanas. Algunas herramientas que sirven para llevar a cabo este análisis se fundamentan en normas locales nacionales, como la NMX-AA-015-1985 y la NADF-024-AMBT-2013, de las cuales se obtienen datos sobre la clasificación, cantidad y origen de los residuos. Asimismo, como información complementaria se pueden identificar cuáles son las empresas predominantes responsables de la generación de los empaques plásticos encontrados durante la auditoría de marcas, la cual sirve para asignar responsabilidades a las compañías que contribuyen a la generación de este tipo de desechos. La implementación de este tipo de estrategias permite tomar de mejores decisiones en política pública y regulaciones, también

---

\* Maestra en Ciencias en Manejo de Recursos Marinos. Doctorante en Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Sustentabilidad (CIIEMAD)-IPN, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1186-6523>; correo electrónico: [jurodriguez@ipn.mx](mailto:jurodriguez@ipn.mx)

\*\* Maestra en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad. Doctorante en Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Sustentabilidad (CIIEMAD)-IPN, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6885-676X>

\*\*\* Doctor en Metalurgia y Materiales. Profesor-investigador en Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Sustentabilidad (CIIEMAD)-IPN, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2056-2698>; Scopus: 14831065400

contribuyen a sensibilizar a la población sobre la importancia de una correcta gestión de residuos, e invita a los consumidores a tomar conciencia al elegir productos de empresas comprometidas con la sostenibilidad.

**Palabras clave:** *residuos sólidos urbanos; auditoría de marcas; NMX-015-AA-1985; NADF-024-AMBT-2013.*

## Introducción

El presente estudio se desarrolla en la Ciudad de México, por lo que se fundamenta en normativas locales y federales diseñadas específicamente para atender las necesidades y características de su población. En este sentido, se define a los residuos sólidos urbanos (RSU) como aquellos

generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole” (LGPGIR, art. 5º, 2003).

Este tipo de residuos constituye un eje ambiental clave donde las comunidades pueden contribuir significativamente a la disminución de su generación y la maximización de su valorización mediante estrategias de manejo adecuadas.

Para alcanzar estos objetivos, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) establece instrumentos como el plan de manejo, definido en el artículo 5º, fracción XXI como:

un instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos específicos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, con fundamento en el Diagnóstico Básico para la

Gestión Integral de Residuos, diseñado bajo los principios de responsabilidad compartida y manejo integral, que considera el conjunto de acciones, procedimientos y medios viables e involucra a productores, importadores, exportadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, usuarios de sub-productos y grandes generadores de residuos, según corresponda, así como a los tres niveles de gobierno.

Dichos planes se sustentan en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos, el cual es una herramienta esencial para identificar la generación, manejo, infraestructura, necesidades y problemáticas asociadas al sistema de gestión de residuos que permitan generar una línea base para la planificación y elaboración de los programas y planes de manejo a nivel municipal y federal (García et al., 2022; SEMARNAT, 2022). Hay dos normas que guían el diagnóstico básico de generación de residuos, una de ellas es la NMX-00-015-1985 que se centra en los residuos sólidos municipales, en la que se aborda el muestreo y el método del cuarteo; la otra es la norma ambiental local de NADF-AMBT-024-2013 en la que se establecen los criterios y las especificaciones técnicas para realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos.

En este estudio también se incorporó el análisis de auditoría de marcas, la cual es una herramienta que busca identificar y documentar las marcas predominantes que se encuentran en los residuos plásticos recolectados durante las actividades de limpieza. Su objetivo principal responsabilizar a las corporaciones por su contribución a la contaminación plástica, presionándolas para que implementen soluciones sostenibles (BFFP, 2019; Borsella y Marchesini, 2024). Desde su primera implementación, estas auditorías han demostrado ser una herramienta poderosa para impulsar el cambio global. Este enfoque nace en 2018 inspirado en el movimiento global Break Free From Plastic (BFFP), que durante su primer episodio reunió más de 10 000 activistas y voluntarios de poco más de 40 países, en el cual reportaron la recolección de más de 180 000 piezas de plástico evidenciando la responsabilidad de empresas como Coca-Cola, PepsiCo y Nestlé (BFFP, 2018).

El presente capítulo tiene como objetivo la elaboración del primer diagnóstico básico de la generación de RSU y el primer análisis de los patrones de

consumo a través de la auditoría de marcas en el Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD).

## **Metodología**

### **Área de estudio**

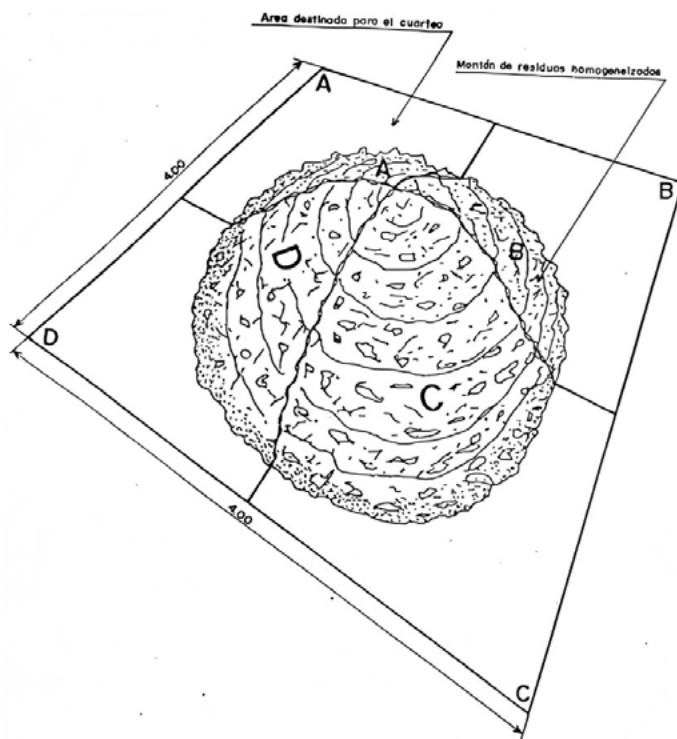
El Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD) es una Unidad Académica del Instituto Politécnico Nacional ubicada en la Ciudad de México, se enfoca en la educación de nivel posgrado, investigación y promoción del desarrollo sustentable desde un enfoque interdisciplinario. Este centro cuenta con una comunidad diversa que incluye personal administrativo, docente, de limpieza, jardinería, estudiantes y visitantes, con una población diaria que oscila entre 50 y 70 personas.

### **Normas NMX-00-015-1985 y NADF-AMBT-024-2013**

La norma NMX-00-015-1985 se centra en la técnica de muestreo y homogenización de la muestra, estableciendo que la recolección de residuos debe realizarse durante un periodo continuo de siete días. Posteriormente, los residuos recolectados se mezclan para lograr una homogenización adecuada que permite proceder al método del cuarteo (figura 1). Este método facilita la subdivisión de la muestra para pesar y cuantificar los diferentes residuos identificados. Para garantizar la representatividad de los datos y evitar sesgos en el muestreo no se informó a la comunidad del CIEMAD sobre las fechas en las que se realizaría la recolección.

El procedimiento requiere la participación de al menos tres personas y se lleva a cabo en una superficie protegida con hule, lona o bolsas, donde se coloca el montículo de residuos sólidos recolectados. Estos se mezclan utilizando una pala para garantizar su homogenización. Posteriormente, el montículo se divide en cuatro partes iguales, identificadas como A, B, C y D (ver figura 1).

Figura 1. Método del cuarteo para homogenización de la muestra de residuos



Fuente: figura tomada del anexo de la NMX-00-015-1985.

El proceso continúa eliminando dos partes opuestas, ya sea A y C o B y D, repitiendo esta operación hasta obtener un mínimo de 50 kg de residuos sólidos que se utiliza para realizar la selección y clasificación, cada subproducto se pesa individualmente en una balanza granataria y se registran los resultados, finalmente el porcentaje en peso se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$PS = \frac{G_1}{G} * 100$$

En donde:

PS = Porcentaje del subproducto considerado; G1 = Peso del subproducto en Kg (descontar el peso de la bolsa o contenedor empleado), y G = Peso total de la muestra (mínimo 50 Kg). El resultado obtenido al sumar

los diferentes porcentajes debe ser como mínimo el 98 % del peso total de la muestra (G). En caso contrario, se debe repetir la determinación.

Por su parte, lo que implica la separación de los residuos se lleva a cabo conforme a lo establecido en la norma NADF-AMBT-024-2013, que divide el proceso en separación primaria y separación secundaria. Esta norma establece una colorimetría específica para identificar cada tipo de residuo (tabla 1), lo cual resulta altamente funcional para generar etiquetas destinadas a los contenedores utilizados en la separación de residuos.

Tabla 1. Clasificación y colorimetría de los residuos asignados en la NADF-AA-024-2013

Residuo	Color	Código
Orgánicos (biodegradables susceptibles a ser aprovechados)	Verde	Pantone 360 o 364; RAL F-9/S2
Residuos inorgánicos con potencial de reciclaje	Gris	Pantone 877 C RAL 738
Papel y cartón con potencial de reciclaje	Beige	Pantone 141 C; RAL 1023
Metales con potencial de reciclaje	Gris claro	Pantone 7540
Plásticos con potencial de reciclaje	Azul	Pantone 541 o 2; RAL 5004
Vidrio con potencial de reciclaje	Blanco	Sin especificar
Residuos inorgánicos de aprovechamiento limitado	Naranja	Pantone 165 C; RAL 2009
Residuos de manejo especial y voluminosos	Marrón	Pantone 463 C; RAL 8017

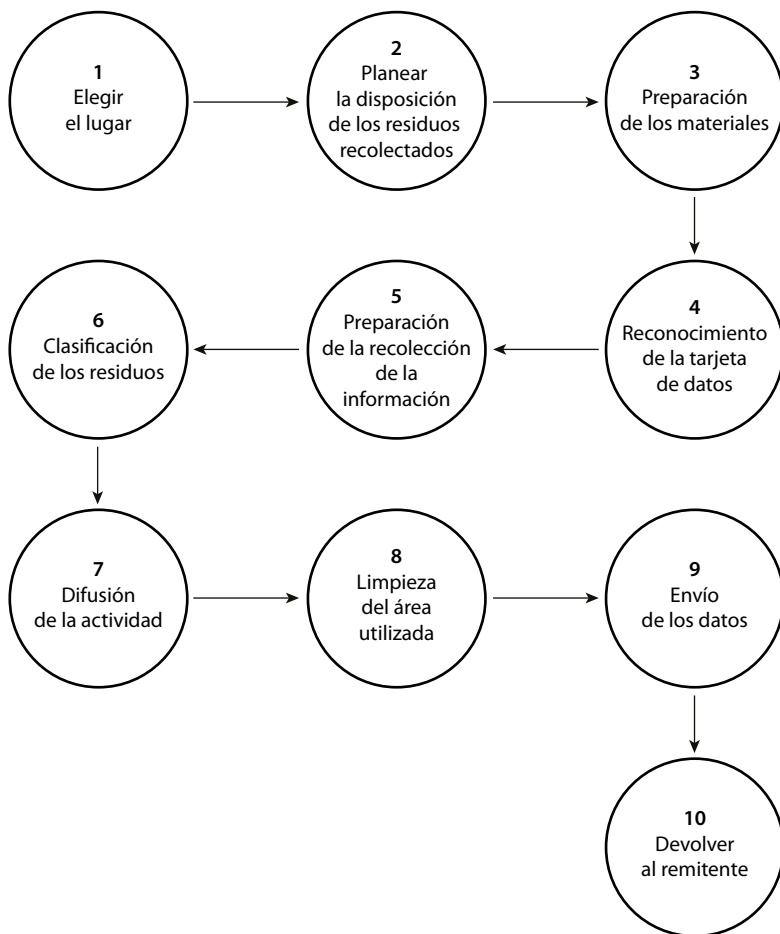
Fuente: elaboración propia, información tomada de la NADF-AA-024-2013.

Auditoría de marcas

Para llevar a cabo la auditoría de marcas, el presente estudio se apoyó en la metodología descrita y modificada por el movimiento global Break Free From Plastic 2017 (BFFB, 2018): <https://brandaudit.breakfreefromplastic.org/brand-audit-sign-up/> (figura 2), en la cual se recolectan durante un periodo de siete días continuos los artículos que dentro de su composición tengan al menos el 50 % de plástico.



Figura 2. Pasos de una auditoría de marcas



Fuente: Rodríguez-Gutiérrez (2024), elaboración propia.

El primer paso es elegir el lugar adecuado para realizar la limpieza tomando en cuenta el tamaño del grupo de voluntarios y la cantidad de residuos que se van a clasificar, se requiere planificar la actividad para obtener los permisos necesarios. Una vez definido el lugar, se debe preparar un plan para disponer adecuadamente los residuos recolectados cuando se haya terminado la actividad, por ejemplo: los materiales reciclables pueden enviarse a instalaciones de reciclaje, los biodegradables se pueden destinar al

compostaje y los residuos no reciclables pueden ser depositados en los carros recolectores.

Es importante preparar los materiales que se van a utilizar, como para el caso de auditorías al aire libre, que se debe contar con guantes, cubrebocas, ropa cómoda, bolsas grandes, contenedores, una lona para clasificar los residuos, bolígrafos, lápices, gomas de borrar, tablas portapapeles, las guías visuales y las tarjetas de datos de auditoría impresas para registrar toda la información. Previamente, todos los participantes deben familiarizarse con la tarjeta de datos de auditoría (<https://brandaudit.breakfreefromplastic.org/brand-audit-training/>), las cuales incluyen detalles como el nombre visible de la marca, la descripción del artículo, el tipo de producto y tipo de material, el número de capas de su composición y el conteo total de artículos similares. Es importante registrar los datos de manera precisa y seguir las instrucciones para identificar correctamente los elementos.

Una vez que ya se tiene todo listo se inicia la separación y clasificación de los residuos, es importante documentar el trabajo tomando fotos del lugar antes y después de la auditoría. Finalmente, se debe limpiar adecuadamente el área y disponer los residuos de acuerdo con la planeación. Los datos recolectados se deberán subir a las plataformas designadas por BFFP (<https://brandaudit.breakfreefromplastic.org/brand-audit-submit/>). De acuerdo con el paso número 10, en caso de contar con el recurso económico, se puede considerar devolver los artículos plásticos a las compañías responsables con una carta explicativa, para incentivar acciones responsables por parte de las empresas.

## Resultados

El periodo de recolección de residuos se llevó a cabo del 21 al 29 de octubre del año 2024 durante los días hábiles, el diagnóstico básico de generación de residuos fue realizado por un equipo interdisciplinario conformado por ocho integrantes, entre alumnos y profesores del CIIEMAD, quienes forman parte del Comité Ambiental del centro.

La tabla 2 muestra los resultados de los residuos identificados de acuerdo con la NADF-AMBT-024-2013; se observan los pesos y proporciones de

cada tipo de residuo siendo 126.7 kg el total de residuos analizados, lo que corresponde a 18.1 kg de residuo/día.

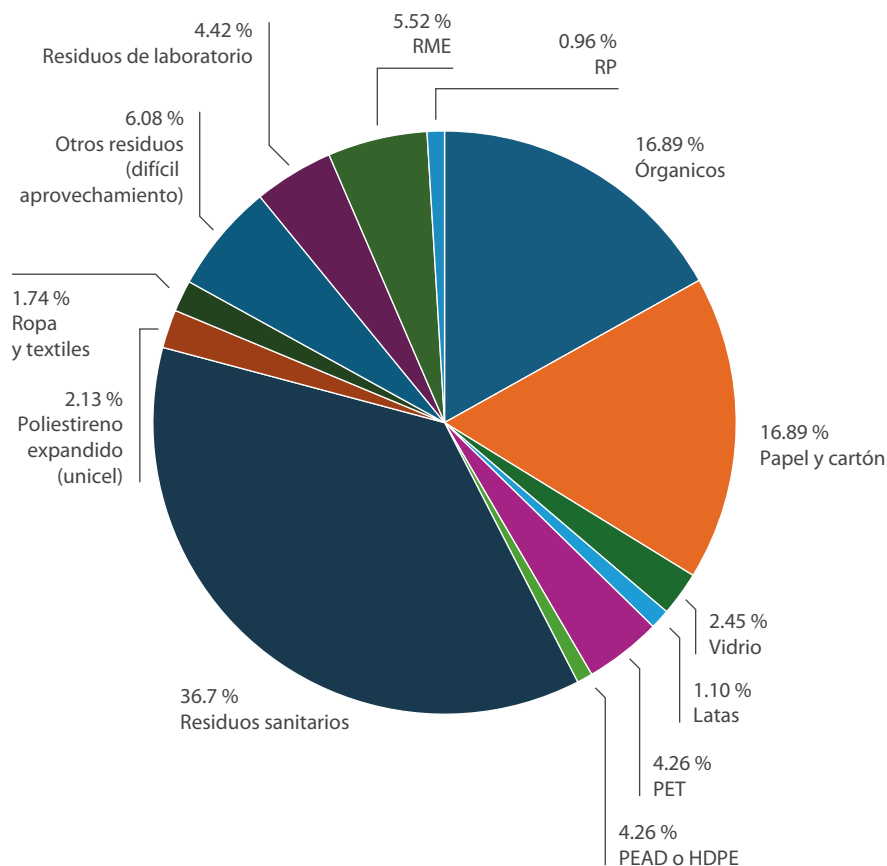
Tabla 2. Promedio de la generación de residuos

<i>Tipo de residuo</i>	<i>Residuos</i>	<i>Cantidad (Kg)</i>	<i>%</i>
<b>Orgánico</b>	Alimenticios	21.4	16.89
	Papel y cartón	21.4	16.89
	Vidrio	3.1	2.45
<b>Inorgánicos con potencial de reciclaje</b>	Latas	1.4	1.10
	PET	5.4	4.26
	PEAD o HDPE	1.1	0.87
	Ropa y textiles	2.2	1.74
	Residuos sanitarios	46.5	36.70
<b>Inorgánicos de aprovechamiento limitado</b>	Otros residuos (difícil aprovechamiento)	7.7	6.08
	Poliestireno expandido (unicel)	2.7	2.13
<b>Residuos de manejo especial (RME)</b>	Cables, electrónicos, partes de mobiliario	7	5.52
<b>Residuos peligrosos (RP)</b>	Residuos de laboratorio	5.6	4.42
	Latas de aerosoles, pinturas y pegamentos caducados, medicamentos caducos	1.2	0.95
<b>SUMA TOTAL:</b>		<b>126.7</b>	<b>100</b>

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del muestreo.

En la gráfica 1 se resalta que el residuo sanitario con un peso de 45.6 kg fue el que más se generó, lo que corresponde a un 36.70 %, seguido de los residuos orgánicos (derivados de alimentos), papel y cartón con potencial de reciclaje; ambas clasificaciones tienen un peso de 21.4 kg, que corresponde al 16.89 %. Los residuos de la tercera posición fueron los residuos clasificados como *otros*, pertenecientes a los residuos inorgánicos de aprovechamiento limitado, con 7.7 kg, y una proporción de 6.08 %; este tipo de residuos son principalmente derivados de empaques y envolturas de alimentos.

Gráfica 1. Porcentajes de los residuos generados en el CIEMAD



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del muestreo.

En el caso del PET (5.4 kg) y el poliestireno expandido, mejor conocido como unicel (2.7 kg), el peso no fue representativo, pero el volumen y la cantidad de unidades encontradas ocasionaron que estos residuos ocuparan mayor espacio en el almacén, lo que demostró la alta frecuencia de su uso dentro de las instalaciones.

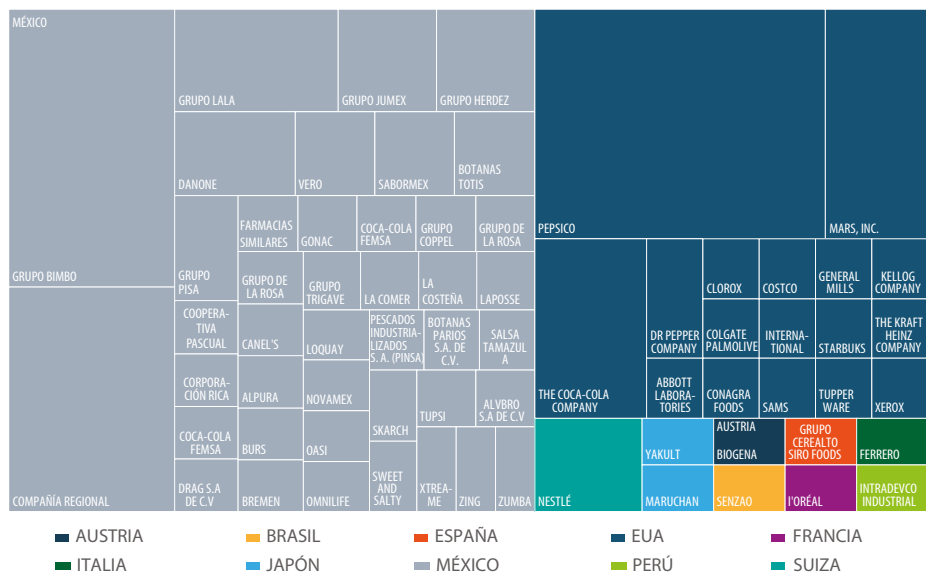
De acuerdo con la composición por tipo de residuo se obtuvo un total de 35.3 kg de residuos inorgánicos con potencial de reciclaje distribuidos de la siguiente manera: 62.6 % papel y cartón, 15.29 % PET, 8.78 % vidrio,

6.23 % ropa y textiles, 3.96 % latas y finalmente el 3.11 % correspondiente al PEAD ó HDPE. Mientras que la composición de los residuos inorgánicos de aprovechamiento limitado con un total de 44.53 kg se distribuyó de la siguiente forma: 82.74 % correspondiente a residuos sanitarios 12.45 % a *otros* y 4.80 % a poliestireno expandido (unicel).

Finalmente, de todos los residuos cuantificados, se encontró que la generación diaria corresponde a 18.1 kg/día, de los cuales los principales residuos generados fueron los orgánicos (3.06 kg/día); esto considerando solo los de tipo alimenticio, ya que también se generan cerca de 200 kg/mes de residuos orgánicos provenientes de la poda y mantenimiento de los jardines; no obstante, estos últimos no fueron considerados por el exceso de volumen acumulado, y porque posteriormente son trasladados a la planta de composta del Instituto Politécnico Nacional. De los residuos inorgánicos de aprovechamiento limitado se genera un promedio total al día de 8.03 kg, de los cuales 6.64 kg/día corresponden a los residuos sanitarios, seguidos de 1 kg/día de otros. Para el tipo de residuos inorgánicos con potencial de reciclaje, al día se generan 5.04 kg de los que 3.16 kg/día son papel y cartón y 0.77 kg/día fueron PET.

Para el caso de la auditoria de marcas se identificaron un total de 644 productos clasificados en cuatro categorías: envoltorios de comida, cuidado personal, productos del hogar y materiales de embalaje, estos eran provenientes de diez países: Austria, Brasil, España, Estados Unidos, México Francia, Italia, Japón, Perú y Suiza. En la gráfica 2 se puede observar la distribución de las marcas por país de origen, siendo 42 compañías mexicanas las que predominan, seguidas de 17 compañías estadounidenses. Se pudo identificar a Grupo Bimbo, PepsiCo, The Coca-Cola Company entre las más populares.

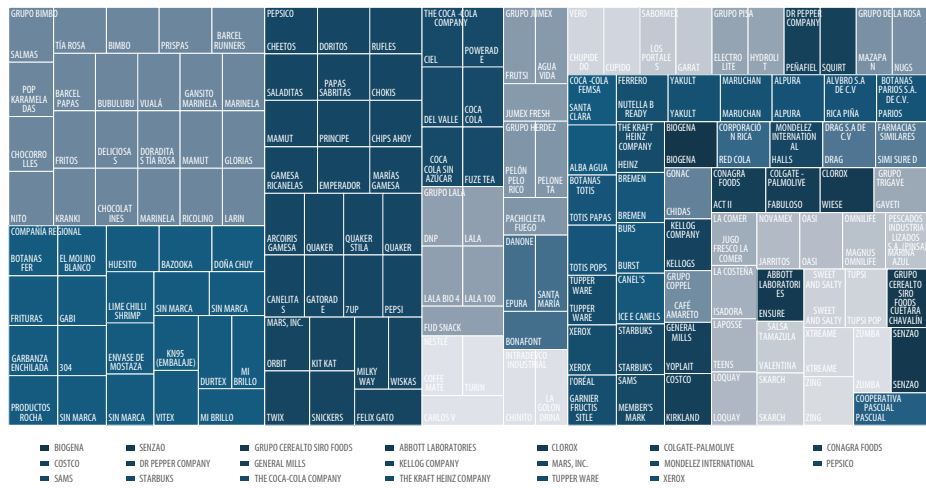
Gráfica 2. Distribución de las compañías identificadas por país de origen



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del muestreo.

En la gráfica 3 se aprecia la distribución de las principales marcas identificadas, entre las que destacan CIEL, EPURA, PEPSI, COCA-COLA Y LALA.

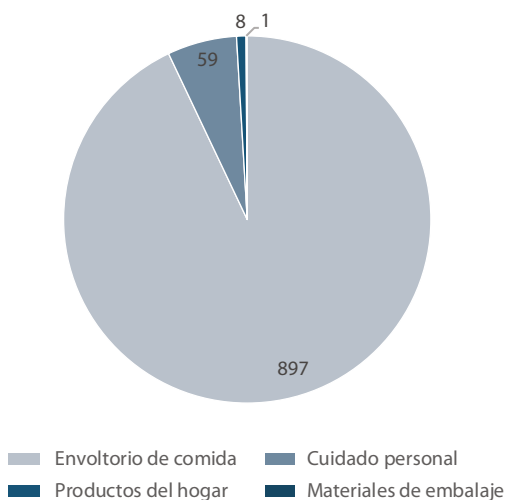
Gráfica 3. Distribución de las marcas identificadas en la auditoría



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del muestreo.

Se identificaron productos de cuatro de las siete clasificaciones; de acuerdo con el tipo de producto (gráfica 4), se encontraron 897 piezas de los envoltorios de comida. Los productos con mayor cantidad de unidades contabilizadas fueron los contenedores de un solo uso (180), botellas de agua (91), botellas de refresco (76), envoltorios de galletas (33), contenedores de yogurt (25) y envoltorios de botanas (27). De los productos de cuidado personal se encontraron jabón facial (1), mascarillas faciales (1) y gel fijador para el cabello (2), mientras que dentro de los productos del hogar se pudo contabilizar guantes (10), botellas de líquidos para limpieza como aromatizantes (11), blanqueadores (2) y removedores de manchas (1), por último, para los productos de embalaje solo se encontró una pieza.

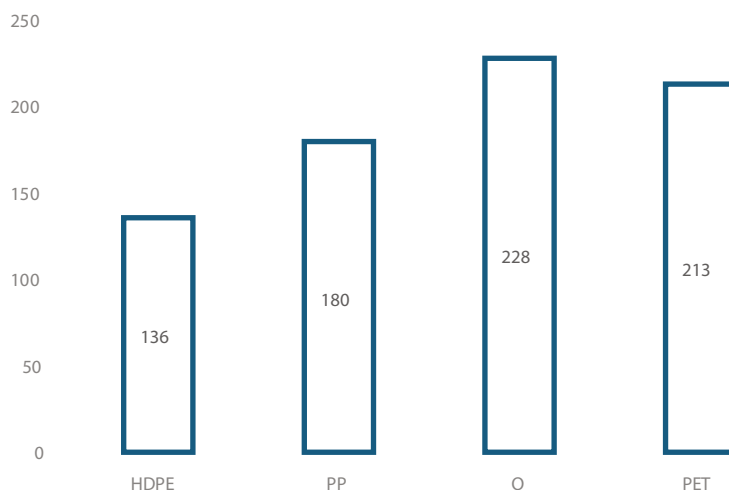
Gráfica 4. Clasificación por tipo de producto



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del muestreo.

También se realizó una clasificación de acuerdo con el número de capas plásticas por las que estaba compuesto el producto y se encontraron 904 piezas de una sola capa y 61 multicapa. En la gráfica 5 se pueden identificar los tipos de materiales plásticos encontrados según su composición polimérica: tereftalato de polietileno (PET) #1, polietileno de alta densidad (HDPE) #2, polipropileno (PP) #5 y otros o desconocidos (O) #7.

Gráfica 5. Tipo de material de acuerdo con la composición polimérica



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del muestreo.

## Discusión

Los resultados del diagnóstico básico de generación de residuos revelan que los residuos sanitarios ocupan el primer lugar en términos de generación, lo cual está relacionado con las necesidades básicas de higiene de la comunidad del centro. Sin embargo, es importante analizar el uso excesivo de toallas de papel empleadas con el fin del secado de manos que podrían estar incrementando el volumen. Esto representa una oportunidad para explorar alternativas más sostenibles. En segundo lugar, se encuentran los residuos orgánicos compuestos en su mayoría por restos de alimentos, estos tienen un alto potencial de aprovechamiento a través de procesos de compostaje; en la misma posición también se identificó al papel y al cartón, otro residuo con un alto potencial de reciclaje. La presencia de este último refleja la naturaleza de las actividades administrativas realizadas en el centro, de las cuales derivan en gran medida documentos impresos, embalajes de los suministros requeridos para el mantenimiento y operación de las instalaciones.



En la medida de lo posible sería importante llevar a cabo una transición hacia prácticas digitales que disminuyan la necesidad de documentos físicos. En tercer lugar, se ubicaron los residuos clasificados como *otros*, los cuales están compuestos principalmente por empaques o envoltorios de alimentos consumidos en el CIEMAD. Resaltan los patrones de consumo en el cual se observa un alto volumen de residuos de alimentos procesados, lo que sugiere la necesidad de fomentar prácticas que reduzcan la dependencia de empaques de un solo uso y aumenten la adopción de contenedores reutilizables o compostables.

Otros de los residuos inorgánicos con potencial de reciclaje que destacan en el diagnóstico son el vidrio, latas y plásticos duros (PEAD o HDPE), estos últimos comúnmente utilizados en envases de alimentos como yogures y productos de limpieza. También se identificaron textiles (trapos para limpieza y ropa) cuya adecuada separación y tratamiento permitiría su reciclaje o reutilización, siempre que no estén contaminados con residuos orgánicos.

La frecuencia de productos de compañías globales como The Coca-Cola Company y PepsiCo focalizan la importancia de involucrar a estas empresas en iniciativas de responsabilidad extendida del productor para reducir su huella plástica.

Los resultados muestran la importancia de adoptar un enfoque integral en la gestión de residuos, lo que incluye estrategias de reducción, promoción de materiales sostenibles y la educación continua en prácticas de separación y aprovechamiento residuos.

## Conclusiones

La elaboración del diagnóstico básico de generación de residuos y la aplicación de la auditoria de marcas destacan su importancia como herramientas fundamentales para la implementación de estrategias que mejoren la gestión integral de los residuos sólidos y la promoción de prácticas sostenibles dentro de la comunidad. Este primer ejercicio proporcionó datos sobre la cantidad, tipos y origen de los residuos generados durante siete días en el CIEMAD, y permitió identificar las áreas de oportunidad que se requie-

ren implementar para minimizar el impacto ambiental que fomenten una conciencia ambiental compartida para lograr un cambio cultural hacia hábitos sostenibles.

La frase “El mejor residuo es el que no se genera” encapsula el propósito último de este ejercicio: no solo gestionar los residuos ya producidos, sino fomentar la reflexión y el cambio hacia la reducción en su generación. Esto se traduce en la necesidad de implementar un plan de manejo de residuos que maximice la valorización de materiales reciclables y reduzca el volumen de desechos enviados a disposición final.

Finalmente, el análisis detallado de los tipos y cantidades de residuos identificados permite mejorar la logística de gestión y fomentar un cambio en los hábitos de consumo y manejo de residuos dentro de la comunidad. Este enfoque puede ser replicable en otros establecimientos de alta afluencia, refuerza la importancia de la educación ambiental y la adopción de prácticas sostenibles para construir comunidades más responsables con su entorno.

## Anexos

Evidencia fotográfica de las actividades.





## Referencias

- Borsella, M. y Marchesini, S. (2024). Crisis de residuos y educación ambiental. *Revista Intercambios. La Letra del Encuentro*, 9(2), 146-153.
- Break Free From Plastic (BFFP). (2018). *Branded in search of the world's top corporate plastic polluters* (vol. 1). Break Free From Plastic. <https://brandaudit.breakfreefromplastic.org/brand-audit-2018/>
- Break Free From Plastic (BFFP). (2019). *Branded in search of the world's top corporate plastic polluters* (vol. 2). Break Free From Plastic. <https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://esdo.org/wp-content/uploads/2023/02/Final-Brand-Audit-Report-2019-by-Nazma.pdf>
- García, D., Cervantes, I., Gómez, W., Gallego, I., García, D. y González, G. (2022). Gestión de los residuos sólidos en México: análisis cualitativo de los diagnósticos básicos. *Interdisciplina*, 11(30), 215-242. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2023.30.81788>.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) de 2003. La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos, en el territorio nacional. 8 de octubre de 2003. DOF 08-05-2023.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-15-1985, que establece el método de cuarteo para residuos sólidos municipales y la obtención de especímenes para los análisis en el laboratorio*.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-22, que establece la selección y el método para la cuantificación de subproductos contenidos en los Residuos Sólidos Municipales*.
- Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. (2013). *Norma Ambiental NA-DF-AMBT-024-2013, que establece los criterios y especificaciones técnicas bajo las cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos del Distrito Federal*.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2022, 9 de diciembre). *Prevención y Gestión Integral de Residuos. Prevención y gestión integral de los residuos*. SEMARNAT.

## 7. Evaluación del manejo de residuos, impacto en trabajadores de limpia y valorización para coprocesamiento



CLAUDIA RODRÍGUEZ TAPIA\*

LUIS RAÚL TOVAR GÁLVEZ\*\*

MARIANA ABIGAIL MUÑOZ DÍAZ\*\*\*

<https://doi.org/10.52501/cc.364.07>

### Resumen

En la CDMX se generan 13 149 ton/día de residuos sólidos urbanos (RSU), hay 12 970 trabajadores que acompañan a choferes en vehículos recolectores de RSU. Asimismo, existen 7 603 barrenderos que recolectan 1 860 ton/día de RSU. Ambos, sin equipo de protección personal (EPP), se exponen a enfermedades gastrointestinales, respiratorias, infecciones virales como el SARS-CoV-2. La vacunación de estos trabajadores y su acceso al agua para lavado de manos son prioridad. La separación en la fuente, basada en la norma NADF-024-AMBT-2013, es clave para mejorar la eficiencia del manejo de residuos. Se realizó un estudio en la CDMX. Los objetivos fueron seguir vehículos recolectores de RSU, previa entrega de EPP a las cuadrillas, recomendar a la población que separe por fuente (NADF-024-AMBT 2013), así como caracterizar, recuperar y determinar el poder calorífico de los RSU. La caracterización de los RSU mostró que la composición no presenta cambios significativos desde 2009, lo que indica que las políticas de reducción o reciclaje no han tenido el impacto esperado. Además, el estudio encontró que los RSU tienen un poder calorífico adecuado para ser procesados en

---

\* Maestra en Ciencias. Profesora-Investigadora en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9061-6017> ; correo electrónico: [crodriguezta@ipn.mx](mailto:crodriguezta@ipn.mx)

\*\* Doctor en Nutrición. Profesor-investigador en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0821-966X>

\*\*\* Maestra en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad. Doctorante en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6885-676X>

hornos cementeros, lo que podría reducir el volumen y contribuye a un manejo sustentable.

**Palabras clave:** *barrenderos; coprocesamiento; covid-19; cuadrillas de vehículos recolectores; separación en fuente.*

## Introducción

En la Ciudad de México (CDMX) se generan 13 149 ton/día de RSU (PGIRS, 2021). El gobierno de la ciudad gasta en la gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) que genera la población, desde la recolección en las alcaldías, en el barrido manual mecánico de las vialidades de la ciudad, hasta la disposición final de los RSU en cinco rellenos sanitarios ubicados: cuatro en el estado de México y otro en Cuautla, Mor., aproximadamente \$2 529 864 200.00 anuales. En contraste, no se realiza una inversión adecuada en equipo de protección personal (EPP) para prevenir el contagio de enfermedades gastrointestinales, respiratorias e infecciones virales como el SARS-CoV-2, lo que deja vulnerables tanto a las cuadrillas que apoyan al operador del vehículo recolector como a los barrenderos, a pesar de que ambos grupos de trabajadores forman el eje del Servicio Público de Limpia de la CDMX. Una de las consecuencias de este descuido es que esto no solo se pone en riesgo la salud de estos trabajadores esenciales, sino que también pueden generarse brotes más amplios en la comunidad, afectando la capacidad del sistema de salud para responder. En este contexto, resulta fundamental analizar el poder calorífico de los residuos, así como definir los tratamientos y medidas preventivas que deben aplicarse (por la ciudadanía, por el personal del Servicio Público de Limpia o de manera conjunta) antes de que dichos residuos ingresen a las estaciones de transferencia (ET).

Uno de los objetivos de este estudio fue explorar estrategias para reducir el contagio de covid-19 entre las cuadrillas que apoyan al operador del vehículo recolector y de la población con la que entran en contacto diariamente durante la recolección de RSU y de residuos covid-19. Estos residuos incluyen los generados por enfermos de covid-19 que se quedan o quedaron

en cuarentena en sus domicilios y los objetos y residuos provenientes de los difuntos por la covid-19 que se entregan al Servicio Público de Limpia y que usualmente vienen mezclados con RSU.

Este estudio analiza la vulnerabilidad de las cuadrillas que acompañan al operador de los vehículos recolectores de residuos sólidos urbanos (RSU) en la Ciudad de México (CDMX), quienes, en su mayoría, no están contratados por las alcaldías y dependen de la recuperación de materiales valorizables. Las cuadrillas están formadas generalmente por cuatro a cinco personas, principalmente voluntarios, y su labor implica la recolección de 1 691 toneladas diarias de residuos. Sin embargo, estos trabajadores carecen de medidas básicas de protección, como distanciamiento social, acceso a agua y jabón, uso de cubrebocas, guantes o lentes de protección.

Además, en la pandemia de covid-19, los trabajadores de estas cuadrillas estuvieron expuestos a un alto riesgo de contagio al manejar residuos mezclados con desechos de personas contagiadas, quienes no siempre seguían las medidas de aislamiento en sus hogares. La falta de protección y la manipulación de residuos potencialmente contaminados incrementa el riesgo de transmisión del virus a los trabajadores, sus familias y la comunidad en general.

El estudio resalta la necesidad de mejorar las condiciones de trabajo de estas cuadrillas, proponiendo un enfoque que, si tiene éxito en la alcaldía Gustavo A. Madero, podría extenderse a otras alcaldías y replicarse en otras entidades del país. A pesar de las acciones de la SEMARNAT para mitigar el riesgo de contagio, se evidenció que las medidas no fueron suficientes, lo que subraya la importancia de implementar estrategias más efectivas y específicas para proteger a estos trabajadores.

Por otro lado, durante el estudio se abordó a la ciudadanía con el mensaje de que debe separar sus RSU, inclusive los residuos covid-19, para no contagiar a las cuadrillas que recogen sus residuos y que si ellos son contagiados con el SARS-CoV-2 contagian a sus familias, a sus compañeros e incluso el contagio regresa a la población. Esta separación en fuente de cuatro fracciones, incluyendo los residuos covid-19, más los residuos de manejo especial por parte de la población, en apego a la Norma Ambiental NADF-024-AMBT 2013, los efectos que se observarían serían producción de más composta para la CDMX proveniente de la fracción orgánica de los re-



residuos sólidos urbanos (FORSU), mayor reciclaje de residuos y un ahorro considerable al reducir la disposición final de los residuos en rellenos sanitarios, con las implicaciones de que habría menos emisiones de gases efecto invernadero, menos contaminación de los mantos freáticos por la disminución de lixiviados generados y, ciertamente, menos contagios producidos por los residuos covid-19.

### **Aproximación de la cantidad de residuos COVID-19 generados en la Ciudad de México**

Durante la pandemia, el gobierno de la CDMX implementó una página web para informar diariamente sobre contagios y defunciones. Sin embargo, este registro comenzó hasta el 1° de octubre de 2020, a pesar de que el primer caso de covid-19 en la ciudad se detectó en febrero de ese mismo año. Se estima que cada persona contagiada generaba 3 kg de residuos covid-19 durante 15 días de cuarentena, mientras que cada defunción producía 6 kg. Entre el 2 de octubre de 2020 y el 8 de febrero de 2021, se generaron aproximadamente 1 709.13 toneladas de residuos covid-19, equivalentes a 12.75 toneladas diarias.

Estos residuos, al no estar separados en la fuente, se mezclaban con los residuos sólidos urbanos (RSU), exponiendo a las cuadrillas de recolección, barrenderos y recicladores a un alto riesgo de contagio, junto con sus familias y la ciudadanía en general. La falta de equipo de protección personal (EPP) y de información agrava la vulnerabilidad de estos trabajadores, especialmente los barrenderos voluntarios, quienes dependen de propinas.

La inadecuada gestión de residuos, junto con la falta de medidas como la separación en la fuente, el uso de cubrebocas, el distanciamiento social y el lavado frecuente de manos, contribuyó al aumento de contagios y defunciones. Entre marzo y octubre de 2020, se registraron 128 529 casos y 12 224 defunciones; mientras que de octubre de 2020 a febrero de 2021 los casos aumentaron a 374 761 y las defunciones a 18 540, reflejando una crisis sanitaria agravada por el manejo deficiente de residuos covid-19.



## La gestión integral de residuos en la Ciudad de México

La CDMX tiene una extensión territorial de 1 485 km<sup>2</sup>, está dividida en 16 alcaldías: Azcapotzalco, Venustiano Carranza, Coyoacán, Cuajimalpa de Morelos, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Iztacalco, Iztapalapa, Benito Juárez, Gustavo A. Madero, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Álvaro Obregón, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco.

La infraestructura con la que cuentan las alcaldías de la CDMX para el manejo de los RSU es de 2 594 vehículos recolectores (SEDEMA, 2019) con 4 a 5 personas, entre choferes y cuadrillas de apoyo, y 7 603 barrenderos. Un alto porcentaje de estos trabajadores son voluntarios, i.e., viven de las propinas de la población y de los materiales que recuperan de los RSU que reciben.

La Secretaría de Obras y Servicios (SOBSE) del gobierno de la CDMX es la que opera 12 ET, 3 PS, 8 plantas de composta, aunque la más grande es la planta de composta de Bordo Poniente (PCBP) con un área de 37 ha y una capacidad de procesar 913 230 ton/año de la FORSU que se generan en la ciudad.

El manejo de los RSU en la CDMX comprende diferentes etapas, como son la generación, recolección, transporte, separación y disposición final.

En la CDMX, las alcaldías deben poner en práctica el programa de separación de los residuos, el cual consiste en acopiar los RSU diariamente o de forma terciada, según sea el caso, adoptando medidas de separación en fuente (por ejemplo, el sistema terciado: inorgánicos, lunes, miércoles, viernes y domingos; orgánicos, martes, jueves y sábados).

La recolección de los RSU consiste en efectuar su recepción en los vehículos recolectores. Para ello existen dos formas de entrega de los usuarios a las cuadrillas de los vehículos recolectores: en la primera, los residuos se entregan mezclados y se depositan en los vehículos recolectores sin ningún tipo de separación. Esta forma ha sido la habitual hasta hace algunos años, y en apego a la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (2019) a partir de 2010 se inició la separación en fuente por parte de la ciudadanía, que es la segunda forma. En esta forma se separan los residuos en fracción orgánica (FO) e inorgánica (FI), depositándolos en los contenedores correspondientes. En la CDMX la flota vehicular con la que se cuenta en muchos casos no es suficiente para la recepción del total de RSU generados, teniendo,

entre otras consecuencias, la mezcla de los RSU o la proliferación en la ciudad de tiraderos a cielo abierto. La segunda forma de recolección de los RSU es a través de los barrenderos mediante carritos, que son tambos de acero al carbón de 200 L colocados encima de una estructura de acero con ruedas. Todos los días los barrenderos hacen barrido de vialidades en las alcaldías, pero de igual forma dan atención a la ciudadanía, que reciben sus residuos y que son posteriormente entregados a los vehículos recolectores que, una vez llenos, se llevan a la ET más cercana a la alcaldía a la que pertenecen, en donde entregan los RSU recolectados.

Aunado a lo anterior, es importante enfatizar que existen tiraderos a cielo abierto de residuos a lo largo y ancho de la ciudad, los cuales en algunos casos los RSU ahí depositados son recogidos por las cuadrillas de los vehículos recolectores antes de iniciar su primer viaje de recolección de residuos domiciliarios.

El objetivo de las estaciones de transferencia (ET) es mejorar la eficiencia del servicio de recolección de residuos sólidos urbanos (RSU), reduciendo el tiempo de traslado de los vehículos recolectores. Sin las ET, los RSU deberían ser entregados directamente en los rellenos sanitarios, la planta de compostaje de basura (PCBP) o las plantas de separación (PS). Las ET, debido a su diseño, permiten disminuir los tiempos de descarga de los residuos y el consumo de combustible de los vehículos. Estas estaciones cuentan con tolvas elevadas y un sistema de descarga en reversa, lo cual facilita la transferencia de RSU desde los vehículos recolectores. Además, tienen una caja de 70 m<sup>3</sup> que recibe los residuos de hasta cinco vehículos y los traslada mediante un tractocamión hacia la PCBP, las PS o los rellenos sanitarios. Las ET operan generalmente de 6:00 a.m. a 10:00 p.m., con algunas, como las de Central de Abasto, Coyoacán y Cuauhtémoc, funcionando las 24 horas del día.

En la Ciudad de México existen tres plantas de separación (PS) y aprovechamiento de residuos sólidos para la selección de subproductos reciclables. La primera se construyó en 1985, en San Juan de Aragón, seguida por otra en el cerro de Santa Catarina en 1996. La más reciente, la PS y compactación de residuos sólidos Fase II, se edificó en 2012 en el complejo de San Juan de Aragón.

En la Estación de Transferencia (ET) GAM en San Juan de Aragón, además de la planta de selección, también se encuentra una planta productora

de combustibles derivados de residuos (CDR), que se envían a las plantas de CEMEX en Hidalgo. También hay una planta de CDR en la ET de Central de Abasto, ubicada en Iztapalapa y que produce aproximadamente 350 toneladas diarias de CDR, utilizadas como combustible alternativo en los hornos de CEMEX. Este proceso de sustitución de combustibles está regulado por la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, que define el coprocesamiento como la integración ambientalmente segura de residuos en otro proceso productivo. Cabe mencionar que la ET Miguel Hidalgo fue cerrada en 2013 y ya no está en operación.

Aunque la población ha permanecido cercana a 9 millones desde 2016, la cantidad de residuos orgánicos de la fracción de residuos sólidos urbanos (FORSU) que llega a la Planta de Compostaje de Bordo Poniente (PCBP) ha disminuido considerablemente. Desde 2010, el programa de separación en la fuente, que facilitaba el manejo de estos residuos, ha experimentado una reducción, y no hay datos actuales sobre cuánto de la FORSU procesa la PCBP (SEDEMA, 2020), aunque se estima en unas 900 toneladas diarias. Las 448 toneladas diarias de FORSU que ya no se procesan en la FORSU se disponen en los rellenos sanitarios, lo que aumenta la cantidad de RSU que llega a los sitios de disposición final, alcanzando aproximadamente 9 225 toneladas diarias. Este proceso implica un costo anual de alrededor de \$1 498 781 000, sin contar las externalidades negativas como el impacto climático debido a la emisión de metano ( $\text{CH}_4$ ) generado por la FORSU enterrada en los rellenos, el tratamiento de lixiviados en los rellenos sanitarios, que posiblemente no se lleva a cabo, y los posibles impactos en los mantos freáticos debido a la disposición de aproximadamente 4 000 toneladas diarias de FORSU en estos sitios.

Otra erogación que hay que considerar en el manejo de los RSU en la CDMX es lo que gastan las alcaldías en la recolección y gestión de los RSU que la ciudadanía genera, por ejemplo, el combustible para mover 2 594 vehículos recolectores 365 días al año, el mantenimiento de estas unidades, así como los gastos para las barredoras mecánicas, los salarios de los operadores de los vehículos recolectores y de los pocos miembros de las cuadrillas contratados por las alcaldías. Adicionalmente, las alcaldías son responsables del barrido de las áreas comunes y vialidades secundarias, el personal con base y en nómina son aproximadamente 1 000 y los voluntarios son 7 000 personas que recorren 15 156 km/día y recolectaron en 2019 cerca de 1 860 ton/día de

residuos sólidos (SEDEMA, 2020). Una aproximación de la cantidad que gasta la ciudad por los conceptos anteriores es de \$1 031 083 000.00 al año.

Una cuestión relevante es que las cuadrillas de los vehículos recolectores recuperaban 1 621 ton/día de RSU (625 kg/día por cada vehículo recolector), a la PCBP se iban 1 348 ton/día de la FORSU limpia que se convertían en 300 ton/día de composta, pero esta composta a la fecha no se comercializa. En las PS el gremio de la pepena recuperó 182 ton/día y de CDR se recuperaron 536 ton/día más 350 ton/día de CDR de la ET Central de Abasto dando un total de 4 037 ton/día. Los RSU que se generaban diariamente eran 12 364 ton/día, de las cuales 1 423 ton/día provenían del Estado de México, por lo que el porcentaje de RSU recuperado en la CDMX fue de 36.9. Sin embargo, quienes más materiales valorizables recuperan fueron las cuadrillas de los vehículos recolectores. Por otro lado, los barrenderos recogieron 1 000 ton/día de RSU en 2016 (SEDEMA, 2017).

Los primeros que entran en contacto con los residuos covid-19 son las cuadrillas que acompañan a los operadores de vehículos recolectores y los barrenderos, los del gremio de la pepena en las PS toman contacto con los RSU y los residuos covid-19 varias horas después y posiblemente los materiales recuperados por las cuadrillas sean una fuente de contagio para el personal de los centros de acopio, que es donde comercializan las cuadrillas los materiales recuperados, esto pues es una aproximación a la dispersión del SARS-CoV-2 acompañando a los RSU que se generan en la CDMX.

La demanda promedio de energía para producir una tonelada de cemento es de 3.3 GJ que corresponden a 120 kg de carbón (Chatziaras et al., 2016), por lo que hipotéticamente los residuos covid-19 no tienen que ser incinerados ni dispuestos en un relleno sanitario, sino más bien valorizados desde el punto de vista energético. El precio de incinerar en 2020 una tonelada de residuos covid-19 en la CDMX, sin recolección ni transporte, era de \$13 000.00 (SENER, SEMARNAT y GIZ, 2018).

Las hipótesis que postulamos fueron: a) el estudio costo-beneficio soporta la adquisición de EPP para las cuadrillas y los barrenderos; b) la fracción inorgánica de los residuos covid-19 puede utilizarse como CDR en hornos cementeros; c) los residuos covid-19 separados en la fuente llegan a las doce ET de la CDMX; d) la composición de los RSU en la GAM es diferente a la que había en 2009.

## **Materiales y métodos**

La investigación se realizó en tres etapas en el periodo comprendido entre septiembre de 2020 y febrero de 2021.

### **Seguimiento a vehículos recolectores y entrega de equipo de protección personal a cuadrillas y barrenderos en la alcaldía GAM**

Se adquirió EPP y se distribuyó semanalmente entre 20 miembros de las cuadrillas de los vehículos recolectores durante un mes en la GAM. Debido a la contingencia sanitaria, la alcaldía GAM estuvo cerrada en diciembre 2020 y enero de 2021, por lo que se decidió acudir a un campamento para vehículos recolectores ubicado en Ticomán e Insurgentes Norte, donde se contactó a tres operadores de vehículos recolectores que recorren la GAM recibiendo RSU de los ciudadanos y los entregan en la ET GAM. Debido a los objetivos del estudio, se acordó seguirlos en sus rutas, fueron tres equipos los que seguían a estos vehículos recolectores de RSU recorriendo múltiples colonias en la GAM, los equipos estuvieron formados por dos personas que entregaron durante tres semanas a cada miembro de la cuadrilla lo siguiente: cubrebocas, careta de PET, lentes de seguridad de material antiempañante, un juego de guantes de carnaza, un asperjador con sanitizante y desinfectante de amplio espectro, un gel antibacterial con 70 % de alcohol y 25 bolsas de polietileno y bagazo de agave parcialmente compostable que eran distribuidas por estas cuadrillas entre la población para el depósito de residuos covid-19 de enfermos que no fueron al hospital y que permanecieron en sus domicilios tanto en su tratamiento como en su convalecencia. La empresa Anguiplast Plásticos Ecológicos (Arandas, Jal.) donó para este estudio 50 000 bolsas.

La distribución de EPP se hizo cada semana, en el campo descubrimos que en la GAM hay personal de barrido, precisamente 1 110 individuos; varios de ellos son voluntarios y tampoco cuentan con EPP, así que decidimos entregarles a 20 barrenderos el EPP que se entregó a las cuadrillas. Cada barrendero atiende a 970 personas al día (SEDEMA, 2019).

Las rutas recorridas fueron: Norte 23-A, Lindavista Vallejo III Secc, Gustavo A. Madero, 07720; Residencial Zacatenco; Colonia Lindavista Vallejo, abarca la Manzana 1 de una unidad habitacional sobre la Calle Poniente 152 esquina con Nte. 35. La ruta cubre Poniente 152, Av. Miguel Othón de Mendizábal y Eje Central Lázaro Cárdenas.

Se realizó un estudio costo-beneficio para la evaluación del suministro de EPP a los trabajadores de la GAM y de la CDMX.

Durante el seguimiento a los vehículos recolectores, entramos en contacto con la población y se trabajó en la concientización con la ciudadanía, sobre la separación en fuente de sus RSU y sobre la separación de los residuos covid-19.

### **Evaluación del poder calorífico superior e inferior de residuos COVID-19**

Se realizó un muestreo adaptado de la NMX-AA-61-1985 para recolectar residuos generados por tres pacientes femeninas (de 27, 29 y 57 años) durante su enfermedad por covid-19, cuyas pruebas fueron positivas el 8 de diciembre de 2020. Se solicitó a las pacientes que recolectaran en bolsas identificables los residuos inorgánicos y descartaran los residuos sanitarios y orgánicos tras desinfectarlos con un sanitizante. Las bolsas y su contenido fueron desinfectados con Bioxan, un sanitizante a base de compuestos cuaternarios de amonio.

Para inactivar el virus, las bolsas fueron selladas y expuestas al sol durante diez días. Después de este periodo, las muestras fueron llevadas al laboratorio, donde las bolsas fueron nuevamente desinfectadas antes de realizar las determinaciones fisicoquímicas. Durante el proceso de composición y minimización de los residuos, el contenido de las bolsas también fue sanitizado. Los residuos encontrados incluyeron cubrebocas, envolturas de medicamentos, vasos de unicel, envases de golosinas, vasos de polipropileno y servilletas de papel.

Las bolsas de muestras obtenidas durante el tiempo de muestreo se pesaron por separado en una balanza analítica y se registraron la fecha de recolección y el peso de cada una. Una vez pesadas, se procedió a realizar la caracterización del contenido con base en la NADF-024-AMBT-2013.

Se preparó una muestra compuesta a partir de los residuos generados por tres pacientes, recortando los subproductos a un tamaño aproximado de 1 cm<sup>2</sup>. Los subproductos fueron recolectados en bolsas de plástico y pesados nuevamente en una balanza analítica. Posteriormente, se siguieron las normativas NMX-AA-015-1985, NMX-AA-016-1984 y NMX-AA-33-1985 para homogenizar las muestras, determinar el contenido de humedad (%H) y el poder calorífico superior de los residuos covid-19.

Se tomaron muestras duplicadas de 5 g de los subproductos, que fueron pesadas, homogenizadas y deshidratadas en estufa a 70±5° C durante 24 horas. Para determinar el porcentaje de sólidos volátiles (%sv), se calcinó en mufla a 550° C durante 2 horas, seguido de enfriamiento y pesaje.

La muestra compuesta se obtuvo mediante el cuarteo, un proceso descrito en la NMX-AA-15-1985. Después de homogenizar el material, se dividió en cuatro partes, eliminando dos de los cuadrantes opuestos y repitiendo el cuarteo. La muestra final de aproximadamente 100 g se pesó, almacenó y se utilizó para realizar las determinaciones de poder calorífico superior e inferior (PCS y PCI). La mezcla descartada también fue pesada y almacenada.

Se determinó el %H y %sv por triplicado a la muestra compuesta. El procedimiento para la obtención del poder calorífico de los RSU requiere de 0.5 a 1 g de muestra homogénea y seca. Para la determinación del poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI), se utilizó un calorímetro de bomba de oxígeno Parr modelo 1341. El proceso comenzó con el pesado de la muestra, que se introdujo en la cápsula de platino del calorímetro. La muestra fue luego sometida a una combustión en presencia de oxígeno a 20 atm dentro de la bomba calorimétrica, utilizando una bujía para generar la chispa que iniciaría la combustión. La temperatura se midió con un termómetro con resolución de 0.01° C.

El calorímetro fue calibrado con una tableta de ácido benzoico de peso y humedad conocidos. Para asegurar una medición precisa, se utilizó un alambre de platino de 10 cm con conductividad térmica adecuada, colocado en contacto con los electrodos del calorímetro y la cápsula de platino. El sistema fue cerrado y llenado con oxígeno, y la muestra se colocó en una chaqueta con agua para regular la temperatura. Se monitoreó la temperatura durante todo el proceso hasta alcanzar la temperatura máxima.

El sistema fue desmontado tras la combustión, liberando el oxígeno y midiendo la longitud del alambre de platino no consumido. Este procedimiento se repitió por duplicado para cada subproducto y por triplicado para la muestra compuesta.

Con un protocolo similar analizamos dos muestras que una planta procesadora de RSU de Huejotzingo, Puebla, que comercializa como CDR en hornos cementeros, muestras que precisamente sustituyen al coque de petróleo (PCS=38.987 MJ/kg; S=5.91%) o al combustóleo (42.45 MJ/kg; S=1.7%; V=290 ppm).

### **¿Y los residuos COVID-19 que la ciudadanía genera en la CDMX en dónde están? y ¿cuál es la composición de los RSU que tira la población de la GAM?**

En septiembre de 2020 solicitamos a la Dirección Ejecutiva de Transferencia y Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos de la SOBSE información sobre la cantidad de residuos covid-19 que llegan a las 12 ET de la CDMX y autorización para realizar un estudio de composición de RSU de ocho vehículos recolectores provenientes de la GAM que entregan en la ET GAM. Se visitaron las 12 ET y se observó que cada una contaba con un área de recepción de residuos covid-19.

Las preguntas que queríamos responder fueron:

¿Llegan residuos covid-19 a la ET GAM siendo esta la segunda alcaldía en la ciudad con mayor número de contagios y defunciones?

¿Qué tanto ha variado la composición de RSU que la población de la GAM genera en medio de la pandemia?

### **Recepción de residuos COVID-19 en las estaciones de transferencia de la CDMX**

En cada una de las 12 ET de la ciudad, la SOBSE colocó contenedores para la recepción de residuos covid-19. Estos contenedores son recolectados por una empresa especializada en el tratamiento de residuos biológicos infec-



ciosos, cuyo personal recoge los residuos mediante un recolector que toma los contenedores y los descarga en el vehículo recolector sin que el personal manipule el contenedor o entre en contacto con los residuos covid-19.

### **Composición de los RSU generados en la alcaldía Gustavo A. Madero**

Derivado de la pandemia por covid-19, fue necesario conocer si la composición de los RSU ha sufrido algún cambio con respecto a 2009, que es cuando se hizo el último estudio sobre la composición y generación de residuos en la CDMX (Orta Ledesma et al., 2014). Para esto se llevó a cabo un ejercicio de caracterización de los RSU que depositaron vehículos recolectores de la GAM. La caracterización de los RSU consistió en determinar la composición de los RSU de ocho vehículos recolectores que entregan en la ET GAM y de ellos tomar una muestra y caracterizar cada una de ellas, esto se realizó en las dos últimas semanas de noviembre de 2020. El trabajo de campo se realizó siguiendo las siguientes Normas Mexicanas:

1. NMX-AA-15-1985 Para la determinación del método de cuarteo.
2. NMX-AA-19-1985 Para la determinación del peso volumétrico *in situ* de los residuos sólidos.
3. NMX-AA-22-1985 Para la determinación de la composición física de los residuos sólidos.

Nos apegamos al procedimiento establecido por esta última norma mexicana, denominado “selección y cuantificación de subproductos”, con algunas modificaciones a los subproductos establecidos en dicha norma y conforme a los nuevos residuos sólidos que ha traído la pandemia desde marzo de 2020.

La toma de muestra se realizó en el patio de la ET GAM donde fueron depositados los RSU de cada vehículo recolector, se tomó la muestra de diferentes partes de estos RSU, para la toma de la muestra se utilizó un bote de plástico de capacidad de 200 L. El bote de plástico se encontraba nuevo, limpio y libre de abolladuras.

El bote de plástico fue llenado con los RSU hasta el tope, para posteriormente elevarlo a una altura de 10 cm aproximadamente y dejarlo caer, repitiendo este procedimiento tres veces y nuevamente llenando el bote hasta el tope. Esta muestra fue transportada del patio al área asignada para realizar el cuarteo.

El procedimiento comenzó con el pesaje de la muestra de residuos sólidos urbanos (RSU) utilizando una báscula de piso, y luego se depositó en el área designada para la homogenización. Los residuos fueron traspaleados con pala y biello hasta lograr una distribución uniforme. Posteriormente, la muestra se dividió en cuatro partes iguales, eliminando las partes opuestas, y de los residuos restantes se seleccionaron los subproductos conforme a la NOM-AA-22, incluyendo equipos de protección personal (EPP) utilizados durante la pandemia de covid-19, cuya generación fue determinada por primera vez.

Los subproductos seleccionados fueron separados en bolsas de polietileno, pesados y registrados en un formulario correspondiente. Tras completar la clasificación, los residuos se trasladaron al patio de descarga para su procesamiento según los procedimientos establecidos en la estación de transferencia (ET) GAM. Finalmente, se determinó el peso volumétrico de los RSU y el porcentaje de cada subproducto proveniente de las ocho muestras, promediando los valores obtenidos.

## Resultados

### **Seguimiento a vehículos recolectores y entrega de equipo de protección personal a cuadrillas y barrenderos en la alcaldía GAM**

En la GAM recolectan RSU cerca de 1 890 personas que constituyen las cuadrillas de los vehículos recolectores que recorren la alcaldía. En el barrido de la alcaldía trabajan 1 100 barrenderos (SEDEMA, 2019). El estudio costo-beneficio arrojó que por cada peso que se gaste en prevención se ahorrarán \$71.67. El EPP que entregamos tanto a las cuadrillas como a los barrenderos para usarse durante los 365 días del año tiene un costo total por persona de \$32 076.00, que correspondería a \$95 907 240.00 para la

GAM. Para el personal de la CDMX serían \$986 978 520.00, que es el 39 % de lo que la CDMX gasta anualmente en la gestión de los RSU. Habría que considerar costos adicionales para que la entrega de estos equipos a los usuarios efectivamente se cumpliera.

### **Poder calorífico superior e inferior de residuos COVID-19**

De la muestra total, las fracciones y subproductos, así como su peso inicial y el peso obtenido después de llevar a cabo la minimización de los residuos covid-19, se encontró que la composición de estos residuos covid-19 contiene más subproductos plásticos que los RSU que se generan en la CDMX y son fácilmente incorporados en los RSU sin que se noten.

El PCS y PCI de la muestra compuesta de los residuos covid-19 fueron  $36.10 \pm 1.65$  MJ/kg y  $33.63 \pm 1.7$  MJ/kg, respectivamente ambos valores en base húmeda. Los resultados de dos materiales de RSU que la planta procesadora de RSU ubicada en Huejotzingo, Puebla, comercializa como CDR a diferentes empresas cementeras tuvieron un PCS y un PCI en base húmeda, para el PCS de  $21.31 \pm 0.99$  MJ/kg y  $24.67 \pm 3.63$  MJ/kg y para el PCI de  $19.67 \pm 0.92$  MJ/kg y  $18.41 \pm 0.25$  MJ/kg, respectivamente.

### **Recepción de residuos COVID-19 en las estaciones de transferencia de la CDMX**

Estos contenedores son recolectados en cada una de las 12 ET por la empresa especializada en el tratamiento de residuos biológicos infecciosos mencionada arriba.

La recepción de los residuos covid-19 en las ET iniciaron desde el 23 de abril, pero fue hasta la semana del 22 al 26 de junio de 2020 que el registro fue semanal.

Del 23 de abril al 17 de septiembre de 2020 (148 días), se recolectaron de las 12 ET 3 192 kilogramos, es decir 21.57 kg/día promedio.

Estos resultados indican que la población citadina arroja al cesto de sus RSU, los residuos covid-19 y que estos se hallan disueltos en los RSU que

llegan a las ET y a las PS aproximadamente 12.75 ton/día de residuos covid-19 se incorporan aleatoriamente a 13 149 ton/día de RSU que se generan en la CDMX.

## **Composición de los RSU generados en la alcaldía Gustavo A. Madero**

Los RSU que se generaron en la GAM en diciembre de 2020 se comparan con los descritos en el estudio de Orta et al. (2014). Se observa que en 2020 hubo menos residuos de materiales de construcción y de poda y mayor cantidad de papel bond y de vidrio transparente, lo que es comprensible por la pandemia.

El peso volumétrico de los RSU que llegaron en los ocho vehículos a la ET GAM fue de  $283.21 \pm 57.40 \text{ kg/m}^3$  lo que esto indica es que los RSU en la GAM no se separan en fuente.

## **Discusión**

La investigación enfocó sus tareas en analizar el manejo de los residuos sólidos urbanos en una región de alta incidencia covid-19 en la CDMX y en un periodo corto pero crítico de la pandemia, especialmente porque se trata de un servicio indispensable que debe operar continuamente aun en condiciones de emergencia sanitaria. En este contexto, resulta incomprensible que las autoridades no hayan tomado conciencia de la fragilidad de sus trabajadores y de los riesgos de contagio para la población. Durante la pandemia, no se garantizó la entrega sistemática de equipos de protección personal (EPP) a las cuadrillas y barrenderos, ni se promovió su vacunación oportuna, privándolos también de información sobre los beneficios de la inmunización.

Cada uno de estos trabajadores tiene contacto diariamente con 50 a 80 ciudadanos, la probabilidad de contagio en ambos sentidos es alta y los recursos económicos para el pago de gastos médicos o de defunción, en el caso de los trabajadores del Servicio Público de Limpia o sus familiares son escasos.

Por lo observado en las ET sobre la recolección de residuos covid-19, evidentemente los residuos covid-19 vienen mezclados con los RSU que genera la población, es pertinente llevar a cabo campañas de información sea por las alcaldías, la SEDEMA o la SOBSE o todas juntas para que la ciudadanía separe sus residuos covid-19 en sus casas apegándose a la NADF-024-AMBT 2013, que quizás deba de modificarse e incluir los residuos covid-19. Es desconcertante que en el PGIR 2021-2025 (SEDEMA, 2021) no se establezcan estrategias para la gestión de los residuos covid-19, supusieron sus autores que la pandemia era pasajera. Este estudio es una propuesta en la dirección de considerar los residuos COVID-19 como un integrante de los RSU de la CDMX y esto hasta que no se logre la separación en fuente realizada por la ciudadanía y mantenida por las cuadrillas y los barrenderos, ambos dependientes de las alcaldías, así como en las ET y PS dependientes de la SOBSE.

El alto contenido de plásticos, el bajo contenido de humedad de la muestra compuesta de los residuos covid-19 ( $5.33 \pm 0.6\%$ ) y el alto contenido de sólidos volátiles que fue de  $95.05 \pm 0.6\%$  influyeron en los altos valores de PCS y PCI en la muestra compuesta de residuos covid-19. Estos resultados sugieren que los residuos covid-19 separados en fuente pueden coprocesarse en hornos cementeros. Esto implicaría que las descargas a cuerpos de agua de estos materiales plásticos y las emisiones a la atmósfera al quemarse en el traspatio de los domicilios se reducirían, con la condición *sine qua non* de que los hornos cementeros cumplan con la NOM-040-ECOL-2002.

El precio para procesar una tonelada de residuos covid-19 es de \$13 000.00 (SENER, SEMARNAT y GIZ, 2018) en incineradores cuyas emisiones a la atmósfera y escorias no se tiene evidencia de que cumplan con la legislación ambiental vigente.

El porcentaje de diferentes plásticos en los RSU de los vehículos recolectores fue del  $18.15 \pm 3.06\%$  aparentemente no fue estadísticamente diferente a lo observado en la GAM en 2009, que entonces fue de  $16.2\%$ . Esto a pesar de la campaña de la SEDEMA contra el uso de plásticos de un solo uso en que no se observa reducción particularmente en polipropileno y en otros plásticos N° 7.

Es notable la presencia de subproductos utilizados por la población debido a los efectos de la pandemia, como cubrebocas, guantes y caretas que

serían posiblemente aún virulentos. Por cada tonelada de RSU habrá en los RSU que recibe la ET GAM, 55 kg identificados como EPP usado.

La campaña emprendida por la SEDEMA para evitar los plásticos de un solo uso, particularmente durante la contingencia ambiental, no parece haber funcionado, sería recomendable que las autoridades lo reconocieran y enfatizaran la separación en la fuente tanto de los RSU como de los residuos covid-19.

Esperamos que la información generada en este estudio sea valorada para consideración y desarrollo de acciones futuras de un mejor manejo de los residuos generados durante situaciones de emergencia sanitaria.

## Conclusiones

La formación de brigadas de personal de salud que informen de los peligros del SARS-CoV-2 a las cuadrillas que acompañan al chofer del vehículo recolector y a los barrenderos es necesaria. El estudio costo-beneficio soporta la adquisición de los EPP para las cuadrillas de los vehículos recolectores y barrenderos de la CDMX, lo recomendable sería que las alcaldías y el Sindicato Único de Trabajadores del Gobierno de la Ciudad de México, o ambos, proporcionen cubrebocas de preferencia lavables, tres semanales por persona y construir en las sedes de las alcaldías un método eficiente de lavado de manos con jabón para estos trabajadores.

Un tratamiento que haga inocua a la fracción inorgánica de los residuos covid-19 puede convertirla en CDR con un alto poder calorífico, sustituyendo combustibles de origen fósil en los hornos cementeros.

La escasa cantidad de residuos covid-19 que llegan a las 12 ET indica que los residuos covid-19 provenientes de enfermos o fallecidos por la covid-19 vienen mezclados con los RSU que la ciudadanía entrega a los vehículos recolectores y a los barrenderos, se requiere entonces un programa de separación en fuente apegándose a la NADF-024-AMBT-2013 e incluso contemplar modificaciones sobre esta separación en fuente de residuos covid-19 tanto en esta norma como en la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (2019).

En cuanto a la composición de RSU en la GAM el contenido de papel bond fue mayor en 2020 que en 2009, la cantidad de materiales de la cons-

trucción fue menor y la presencia de EPP usado fue ciertamente mayor en 2020, estos cambios se explican por la pandemia que sufrió el país entre noviembre de 2020 a febrero de 2021 y que tal parece en diciembre de 2021 se intensificará.

## Agradecimientos

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología nos apoyó con financiamiento para el desarrollo del proyecto número 313193, formalizado el 10 de junio de 2020 y concluido el 7 de junio de 2021.

## Referencias

- Chatziaras, N., Psomopoulos, C. S., Themelis, N. J. (2016). Use of waste derived fuels in cement industry: a review. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 27, 178-193.
- Cruz Flores, A. (2021, 24 de enero). En el desamparo, trabajadores de limpia se la rifan ante el Covid-19. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/01/24/capital/en-el-desamparo-trabajadores-de-limpia-se-la-rifan-ante-el-covid-19/>
- Kampf, G., Pfaender, T. S. y Steinmann, E. (2020). Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents. *Journal of Hospital Infection*, (104), 246-251.
- Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal de 2003. La presente Ley es de observancia en el Distrito Federal, sus disposiciones son de orden público e interés social, y tiene por objeto regular la gestión integral de los residuos sólidos considerados como no peligrosos, así como la prestación del servicio público de limpia. 22 de abril de 2003. Gaceta Oficial de la Ciudad de México del 25 de junio de 2019.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) de 2003. La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos, en el territorio nacional. 8 de octubre de 2003. DOF 18-02-2021.
- Orta Ledesma de Velásquez, M. T., Saucedo Castañeda, G. y Tovar Gálvez, L. R. (2014). *Composición y generación de residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México durante 2008 -2009. Incluye los generados en la Central de Abasto del D.F.* (2ª ed.). Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

- Prather, K. A., Wang, C. C. y Schooley, R. T. (2020). Reducing transmission of SARS-CoV-2. *Science*, 368(6498), 1422-1424.
- Sadzawka, R. A., Carrasco, M. A. R., Grez, R. Z. y Mora, M. L. G. (2005). Métodos de análisis de compost. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas*, (30).
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-15-1985, que establece el método de cuarteo para residuos sólidos municipales y la obtención de especímenes para los análisis en el laboratorio*.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-016-1984, que establece el método llamado de Estufa que determina el porcentaje de humedad, contenido en los residuos sólidos municipales; se basa en la pérdida de peso que sufre la muestra cuando se somete a las condiciones de tiempo y temperatura que se establecen en esta norma, considerando que dicha pérdida se origina por la eliminación de agua*.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-33-1985, que especifica un método de prueba para determinar el poder calorífico superior de los residuos sólidos municipales, empleando una bomba calorimétrica de los diferentes tipos para planear y diseñar los sistemas adecuados de disposición final de los mismos*.
- Secretaría de Energía (SENER), Secretaría del Medio Ambiente (SEMARNAT) y GIZ. (2018). *Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México, Plan-tas de incineración de residuos sólidos urbanos. Revisión de costos y emisiones a la atmósfera, con una aproximación a los rellenos sanitarios*. SENER, SEMARNAT, GIZ.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-61-1985, que especifica un método para determinar la generación de residuos sólidos municipales a partir de un muestreo estadístico aleatorio*. 8 de agosto de 1985. DOF 06-10-1992.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-040-ECOL-2002, que establece en materia de protección a la atmósfera que la calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y las regiones del país, por lo que las emisiones de contaminantes de la atmósfera, sean de fuentes artificiales o naturales, fijas o móviles, deben ser reducidas y controladas para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico*. 18 de diciembre de 2002. DOF 18-12-2002.
- Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA). (2020). *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México 2019*. SEDEMA. <http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/storage/app/media/docpub/sedema/inventarioderesiduossolidos-ciudaddemexico-2019.pdf>
- Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA). (2020). *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México 2018*. SEDEMA. <http://www.sadsma.cdmx.gob.mx:9000/datos/storage/app/media/docpub/sedema/IRS-2018-VF-09-09-2019.pdf>
- Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA). (2021). *Programa de Gestión Integral de Residuos para la Ciudad de México. PGIR 2021-2025*. SEDEMA. [https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGEIRA/PGIR/PGIR%202021-2025\\_N\\_ago21.pdf](https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGEIRA/PGIR/PGIR%202021-2025_N_ago21.pdf)



- Secretaría del Medio Ambiente (SEMARNAT). (2003). *Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial*. 10 de octubre de 2003. DOF 20-10-2004.
- Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. (2013). *Norma Ambiental NADF-024-AMBT 2013, que establece los criterios y especificaciones técnicas bajo los cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos del Distrito Federal*. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/IRS-2016.pdf> Consultado el 2 de febrero de 2021.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). *Cartilla de mejores prácticas para la prevención del covid-19 en el manejo de los residuos sólidos urbanos*. SEMARNAT.
- Ulrich, A. E. y Frossard, E. (2014). On the history of a reoccurring concept: Phosphorus scarcity. *Science of the Total Environment*, 490, 694-707.
- Van Doremalen, N., Dylan H. M., Holbrook M. G., Gamble, A., Williamson B. N., Tamin, A., Lloyd-Smith, J. O., de Wit, E., Munster, V. J. (2020). Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *The New England Journal of Medicine*, (382), 1564-1567.



## 8. Disruptores endocrinos: de las aguas residuales al medioambiente y la importancia de su regulación



MONSERRAT ESPINOSA BAUTISTA\*

MARÍA YOLANDA LEONOR ORDAZ GUILLÉN\*\*

OCTAVIO AGUILAR MARTÍNEZ\*\*\*

<https://doi.org/10.52501/cc.364.08>

### Resumen

La contaminación provocada por disruptores endócrinos (DE) se ha abordado desde diferentes áreas y enfoques. Este capítulo presenta un enfoque interdisciplinario de la contaminación por DE, su presencia en las aguas residuales, las posibles rutas para llegar a la interacción no regulada con el ambiente y las afectaciones que esto implica. Se aborda la contaminación del agua con DE a nivel nacional e internacional, así como el inminente riesgo al que se ven expuestas las poblaciones como consecuencia de la interacción en el ambiente, por esta razón también se exploran los problemas a la salud que son consecuencia de la exposición. La evidencia científica señala que la contaminación por DE es un problema de la sociedad actual y la importancia que tiene su mitigación. Una forma de alcanzar esto es fortalecer el marco normativo relacionado a los DE, por ello se analiza una parte del marco normativo existente a nivel global y se hace una revisión exhaustiva del marco normativo mexicano vigente. El estudio del marco normativo de este capítulo genera una propuesta de foro nacional que agrupe a miembros de la sociedad, científicos y tomadores de decisiones, con el objetivo de articular la normatividad dirigida a los disruptores endocrinos.

---

\* Maestra en Ciencias. Doctorante en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9672-0322> ; correo electrónico: 53montse@gmail.com

\*\* Doctora en Ciencias Químico-biológicas. Profesora-investigadora en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5060-3596>

\*\*\* Doctor en Ciencias Químicas. Profesor en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4809-9674>

**Palabras clave:** *contaminantes orgánicos, toxicología, sistema endocrino, aguas contaminadas, regulaciones, normativa.*

## Introducción

Los contaminantes químicos que poseen características de disruptores endócrinos (DE) son un problema emergente de preocupación global, ya que poseen efecto estrogénico, toxicidad, persistencia y bioacumulación. En los últimos años, organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), han aceptado el inminente riesgo que representan los contaminantes que alteran el sistema endócrino.

El sistema endócrino es uno de los tres principales sistemas de transmisión de información de los seres humanos y juega un papel clave en la regulación de diversas funciones y el mantenimiento del cuerpo. Los trastornos del sistema endócrino pueden causar enfermedades. Este sistema es responsable de funciones múltiples en el cuerpo como el crecimiento y desarrollo, hasta la regulación de la temperatura corporal; además, el sistema endócrino mediante las glándulas endocrinas secreta hormonas que mantienen el equilibrio hormonal requerido en el cuerpo (Gao et al., 2020).

Los DE son sustancias exógenas que causan efectos adversos a la salud de un organismo, o su progenie, pueden ocasionar consecuentes cambios en la función endocrina (Marlatt et al. 2022). En México los DE están presentes en las aguas residuales.

Esta problemática se explica en el Valle de Mezquital ubicado en el estado de Hidalgo. Esta región es el ejemplo más antiguo y grande del mundo con respecto al uso de aguas residuales no tratadas para el riego agrícola. Existe alta recarga artificial de los acuíferos del Valle de Mezquital derivada del riego, por ello el agua subterránea se extrae para consumo humano y hay planes para utilizar esta agua subterránea como un recurso para la Ciudad de México. Derivado de esto, se estudiaron las características del agua en esta región y se encontraron 218 micro contaminantes orgánicos en aguas

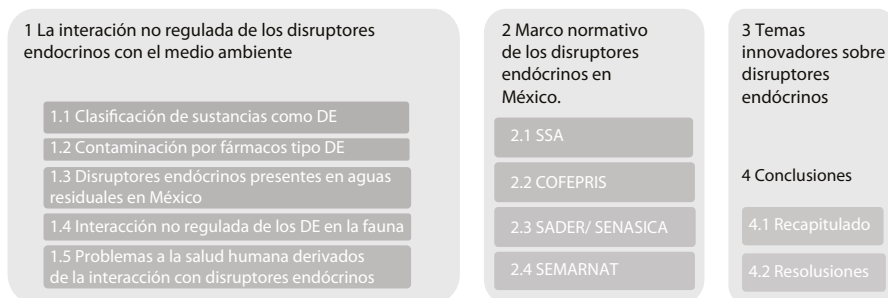
residuales, manantiales y aguas subterráneas, de las cuales al menos 150 micro contaminantes son disruptores endócrinos (Chávez-Mejía et al., 2019; Siemens et al., 2008).

La descarga de aguas residuales sin tratamiento provoca la contaminación de los cuerpos de agua receptores; disminuye la calidad de las aguas superficiales y subterráneas; pone en riesgo la salud humana y la integridad de los ecosistemas. Existe mucha información sobre la contaminación por DE, es necesario estudiar las investigaciones de los últimos años para conocer la situación actual de estos contaminantes.

La presente investigación muestra la problemática actual de los DE, así como su interacción con el medioambiente, reconociéndolo como un conjunto de elementos del entorno natural, sus factores físicos y biológicos, así como los seres vivos que lo habitan. Se analiza el marco normativo mexicano para conocer las regulaciones relacionadas a los DE.

El diseño metodológico de esta investigación tiene un enfoque interdisciplinario, se estudia la bibliografía de diferentes disciplinas científicas como la química, la ingeniería, las ciencias sociales, las ciencias ambientales, las ciencias de la salud, entre otras, con el objetivo de conocer los riesgos en el medioambiente y la salud humana derivados de la exposición a los contaminantes disruptores endócrinos, así como la normatividad mexicana existente. Este estudio presenta la información de forma diserta y concisa, en orden y de fácil acceso para el lector a través de tablas y figuras que resumen información obtenida de diversas fuentes bibliográficas. El contenido de esta investigación se presenta en la figura 1.

Figura 1. *Contenido*



Fuente: elaboración propia.

## **La interacción no regulada de los disruptores endocrinos con el medioambiente**

Los DE se pueden encontrar en diferentes productos como plaguicidas, retardantes de llama, fármacos, aditivos para plásticos y en cosméticos, por mencionar solo algunos; estos generan residuos, lo que quiere decir que los DE pueden ser liberados de los materiales que los contienen y sus efectos dependen del nivel y tiempo de exposición. Esta situación es crítica cuando se produce la exposición durante la etapa del humano en desarrollo (International Programme on Chemical Safety, 2002; Bergman et al., 2012).

### **Clasificación de sustancias como DE**

En la actualidad no existe un listado oficial sobre disruptores endócrinos, ninguna organización ha publicado un listado de sustancias que haya sido aceptado por algún grupo de organizaciones formales de respaldo científico; sin embargo, diversas entidades o grupos de trabajo, por su cuenta, han construido un bosquejo de las sustancias químicas que tiene como característica ser DE.

La Sociedad de Endocrinología (Endocrine Society) estima que existen más de 350 000 sustancias químicas DE. Además, considera que se deben redoblar los esfuerzos para seguir con las investigaciones sobre productos sospechosos de ser DE, con el fin de proteger a la población y el medioambiente (Flaws et al., 2020).

Por su parte, el Parlamento Europeo ha publicado en el Diario Oficial de la Unión Europea, una serie de reglamentos para establecer criterios científicos para la determinación de las propiedades de alteración endocrina, estos reglamentos son constantemente actualizados y publicados nuevamente en el Diario Oficial (Demeneix y Slama, 2020).

El Gobierno de España por medio del Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social, en conjunto con la Fundación Estatal para la Prevención de Riesgos Laborales y el Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (ISTAS), crearon el sitio web RISCTOX, que alberga la información de

más 100 000 sustancias tóxicas y peligrosas, las clasifica y denomina desde los problemas a la salud que provoca el contacto con estas, hasta indicaciones de manejo de residuos, así como en algunos casos clasifica las sustancias como DE (RISCTOX, 2018).

Con base en la tabla 1, y mediante una metodología de revisión sistemática, se consideró la bibliografía encontrada en ScienceDirect, en la página de RISCTOX (2018) del Gobierno de España, en las publicaciones de la OMS, en las publicaciones del Parlamento Europeo y en las publicaciones de la Sociedad de Endocrinología; por lo que si en más de dos de las referencias bibliográficas mencionadas se considera la sustancia como DE, entonces se toma en cuenta para este trabajo.

Tabla 1. *Clasificación de sustancias como DE*

Al interactuar de forma directa o indirecta con una sustancia sospechosa de ser DE:	Muestra efectos adversos sobre los organismos. Un cambio en la morfología, la fisiología, el crecimiento, el desarrollo, la reproducción o la duración de la vida de un organismo, sistema o su población.
	Los organismos, sus sistemas o poblaciones se ven afectados en la eficiencia de su capacidad funcional, una disminución de su capacidad de compensar el estrés adicional, o un incremento de su susceptibilidad a otras influencias.
	Altera las funciones del sistema endócrino.
	El efecto adverso se debe al modo de acción endócrina.

Fuente: elaboración propia con información de la Flaws et al., 2020; Demeneix y Slama, 2020; RISCTOX, 2018; Reglamento (UE) 2018/605 de la Comisión, 2018; Reglamento Delegado (UE) 2017/2100 de la Comisión, 2017.

## Contaminación por fármacos tipo DE

Existen diferentes fuentes de proveniencia de los DE contenidas en aguas residuales, tal es el caso de medicamentos, desechos hospitalarios, productos empleados en veterinaria, entre otros (Roy et al., 2022).

Los fármacos se han convertido en una preocupación creciente, debido a que podrían llegar a las fuentes de agua potable (OMS, 2018), lo que conlleva a una interacción no regulada del consumo humano de DE y su posible contacto con el ambiente.

Las principales vías de contaminación están relacionadas con el consumo y la excreción de fármacos y metabolitos en orina y heces, en conse-

cuencia, las principales vías de entrada en el medioambiente acuático son las aguas residuales, en las que se incluyen las urbanas, hospitalarias, industriales, agrícolas y ganaderas, ver figura 2 (Agirrezabala, 2016).

Figura 2. Ciclo de los fármacos emergentes en aguas residuales



Fuente: elaboración propia con información de OMS (2018); Flaws et al., (2020).

El uso excesivo de productos farmacéuticos que contienen DE, como píldoras anticonceptivas, analgésicos y antibióticos, impacta a los ecosistemas acuáticos y la salud de los humanos; dichos productos se metabolizan parcialmente dentro del cuerpo humano y una atracción se diseminan a través de la orina y las heces, las cuales van a parar a las aguas residuales municipales que a veces tienen uso agrícola. Los antibióticos y las hormonas



también están llegando al medioambiente desde una variedad de sectores de producción de alimentos, incluyendo la acuicultura, la ganadería, la cría de cerdos y el sector avícola (Mathew et al., 2020). Además, los DE son consumidos por algas, plantas y microorganismos, y pasan a través de los animales durante la ingestión de plantas. Los DE se pueden acumular en los tejidos del cuerpo de los seres humanos, dicha acumulación puede alterar el sistema endócrino causando enfermedades graves e incluso la muerte (Roy et al., 2022).

### **Disruptores endócrinos presentes en aguas residuales en México**

La población total en México, de acuerdo con Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) es de 126 014 024 personas (INEGI, 2020). Según datos de Conagua-SINA (Comisión Nacional del Agua-Sistema Nacional De Información Del Agua) cada una de esas personas utiliza 380 litros de agua al día (Conagua-SINA, 2020); lo anterior se refleja en las cifras que proporciona la SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) y Conagua, donde manifiestan que, en México durante el año 2020, se descargaron 8.82 miles de  $\text{hm}^3/\text{año}$  ( $279.8 \text{ m}^3/\text{s}$ ) de aguas residuales municipales (Conagua, 2022).

Por lo que, en los últimos años, diversos autores (Chávez-Mejía et al., 2019; Félix-Cañedo et al., 2013; Lesser et al., 2018; Siemens et al., 2008) han elegido como área de estudio el flujo de aguas residuales desde la zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) hasta el Valle del Mezquital y a través del sistema de riego. Las aguas residuales se descargan de tres canales de la ZMCM, de los cuales solo un canal está completamente cubierto. Este canal descarga aproximadamente la mitad de las aguas residuales de la ZMCM. El tiempo promedio de viaje para las aguas residuales desde la ZMCM hasta el Valle del Mezquital es de aproximadamente un día. En la parte sur del Valle de Mezquital, cerca de las salidas de las aguas residuales, se riegan los cultivos con esta agua residual sin tratar. Una parte del agua residual se almacena en un reservorio, con un tiempo de residencia promedio de aproximadamente tres meses. En el embalse, las aguas residuales se someten a un tratamiento primario por sedimentación. Esta agua se utiliza principalmente para el riego en la parte norte del Valle. El agua de riego se distribuye con

una velocidad de flujo de 0.6 m<sup>3</sup>/s (en canales abiertos sin límites) a 1.1 m<sup>3</sup>/s (en canales forrados abiertos). El tiempo de viaje para el agua desde las salidas principales hasta los campos es de menos de un día. El agua residual derivada del exceso de riego se descarga en los canales de drenaje y en los manantiales del río Tula. La contaminación por fármacos en esta área es inminente, pues diversos estudios realizados en la zona reportan entre 11 y 2018 fármacos diferentes, en los que se incluyen diversas hormonas.

Con la finalidad de reportar la situación actual de los contaminantes DE en aguas residuales en México se revisaron publicaciones de los últimos 10 años. La primera búsqueda se realizó en la base de datos de ScienceDirect y Web of Science. La tabla 2 presenta una recopilación de la concentración de DE encontrados en las aguas residuales de las diferentes regiones de la República mexicana. Los parámetros para considerar los contaminantes tipo DE se tomaron con base en el apartado 2.2 Clasificación de sustancias como DE.

Tabla 2. Concentración (ng/L) de DE presentes en aguas residuales en México

DE	Valle de Bravo, Edomex	Valle del Mezquital, Hgo.	Monterrey, N. L.	Guana-juato, Gto.	Toluca, Edomex	Cihuahatlán, Jal.	Puebla de Zaragoza, Pue.
Bisfenol A	85 (a)	9,340 (b)	420 (c)	--	--	--	--
Estrona	65.4 (a)	78.9 (b)	--	53.5 (a)	--	--	--
17β-Estradiol	44.8 (a)	40.8 (b)	15 (c)	31.5 (a)	800 (d)	--	--
4-Nonilfenol	--	50 000 (e)	19 (c)	--	--	--	--
Triclosan	--	1 070 (b)	--	926 (a)	--	--	--
Carbamazepina	43.7 (a)	42 800 (b)	--	--	--	--	--
ftalato de butilbencilo	50 000 (a)	--	--	--	--	--	--
ftalato de bis-dietilhexilo	--	62.26 (b)	--	--	--	--	--
Testosterona	79.3 (a)	--	--	88.5 (a)	--	--	--
Fenol	--	27.89 (b)	--	--	--	--	--
Cafeína	6 430 (a)	189 (b)	--	31 100 (a)	--	--	--
Teofilina	10 400 (a)	--	--	20 100 (a)	--	--	--
Cotinina	453 (a)	1 670 (b)	--	1 580 (a)	--	--	--
Cocaína	23.8 (a)	252 (b)	--	--	--	--	--
Sulfametoxazol	641 (a)	76.2 (b)	--	2 050 (a)	--	--	--
Paraxantina	2 870 (a)	--	--	24 000 (a)	--	--	--
Valsartan	--	--	--	1 900 (a)	--	--	--
Progesterona	47.4 (a)	--	--	80.2 (a)	--	--	--
Androsterona	3 020 (a)	--	--	10 800 (a)	--	--	--
Mestranol	4.41 (a)	--	--	--	--	--	--

DE	Valle de Bravo, Edomex	Valle del Mezquital, Hgo.	Monterrey, N. L.	Guana- juato, Gto.	Toluca, Edomex	Cihuatlán, Jal.	Puebla de Zaragoza, Pue.
Estradiol	--	14.2 (b)	--	--	--	2 200 (f)	--
Hidrocortisona	--	--	--	--	--	--	14.4 (g)
Cadmio	--	--	--	--	390 (d)	--	480 (g)
Cromo	--	--	--	--	51 (d)	--	710 (g)
Mercurio	--	--	--	--	21 (d)	--	410 (g)
Plomo	--	--	--	--	123 (d)	--	180 000 (g)
Níquel	--	--	--	--	17 (d)	--	790 (g)
Arsénico	--	--	--	--	14 (d)	--	410 (g)
Ketorolaco	--	--	--	--	--	4 500 (f)	373.8 (g)
Ibuprofeno	2 140 (a)	5 190 (b)	--	1 800 (a)	620 (d)	--	10 (g)
Paracetamol	18 500 (a)	67 200 (b)	--	66 000 (a)	266 (d)	--	52 (g)
Dexametasona	--	--	--	--	--	--	980 (g)
Ketoprofeno	--	50 000 (e)	--	--	--	--	--
Diclofenaco	--	50 000 (e)	--	--	590 (d)	5 500 (f)	--
Salbutamol	11.5 (a)	--	--	16.4 (a)	--	--	--
Anfetamina	46.1 (a)	213 (b)	--	102 (a)	--	--	--
Triamtereno	--	--	--	--	--	--	--
Tetraciclina	--	--	--	112 (a)	--	--	--
Furosemida	--	--	--	514 (a)	--	--	--
Gemfibrozilo	605 (a)	469 (b)	--	73.9 (a)	--	--	--
Glibenclamida	--	--	--	129 (a)	197 (d)	--	--
Hidroclorotiazida	--	180 (b)	--	93.3 (a)	--	--	--
Triclocarban	287 (a)	908 (b)	--	398 (a)	--	--	--
Androstenediona	371 (a)	--	--	--	--	--	--

Fuente: elaboración propia con información de: Estrada-Arriaga et al. (2016), Lesser et al. (2018), López-Velázquez et al. (2021), Pérez-Alvarez et al. (2018), Chávez-Mejía et al. (2019), Arguello-Pérez et al. (2019), Tenorio-Chávez et al. (2020).

## Interacción no regulada de los DE en la fauna

Los DE tienen un efecto destructivo en el ecosistema, especialmente en los cuerpos de agua, por lo que tiene un fuerte impacto en los animales acuáticos. Los DE afectan gravemente la fauna, ya que estos compuestos pueden permanecer en las poblaciones mucho tiempo después de la exposición (Roy et al., 2022). En suma, los DE pueden tener efectos biológicos significativos incluso a nivel de trazas (Mathew et al., 2020).

La tabla 3, presenta un resumen de 12 especies que se han expuesto a diversos DE, y concentraciones distintas, lo que ha provocado un efecto adverso en sus sistemas. Los DE mencionados fueron clasificados según el apartado 2.2 Clasificación de sustancias como DE.

Tabla 3. Interacción de los DE en la fauna

Especie	Concentración	DE	Efecto adverso	Referencia
<b>Pez cebra (embriones)</b>	0.003 – 177.5 µM	Bisfenol A Perfluorooctano sulfurado Tributilo de estaño	Cambios en el metabolismo con respecto a lípidos y retinoides	(Ortiz-Villanueva et al., 2018)
<b>Pez Hotentones</b>	11.9 - 46.0 ng/g	Diclofenaco	Bioacumulación en todos los órganos.	(Ojemaye y Petrik, 2019)
<b>Pez robalo de piedra</b>	0.10- 1.01 ng/mL	17β- estradiol	Variaciones estacionales de acuerdo con su ciclo reproductivo.	(Ferreira et al 2021)
<b>Pez barbo Pez rutilo Pez bagre Paz naso Pez leucisco</b>	1.4 - 12.4 ng/g	Alquilo perfluoradas y polifluoradas	Bioacumulación en músculos.	(Semerád, et al 2021)
<b>Rana de uñas africana</b>	0.05, 0.11 y 0.14 mg / L	Dibromuro de Diquat	Interrupción en la etapa del desarrollo.	(Babalola y van Wyk, 2021)
<b>Rata</b>	0.05, 5 y 25 mg / kg / día*	Perfluoroalquilo y Polifluoroalquilo	La exposición temprana influye en el peso corporal del adulto.	(Tetzlaff et al., 2021)
<b>Cerdo</b>	0.2 - 16 µg / mL	Glifosfato	Afecta la función reproductiva y la homeostasis de los tejidos adiposos.	(Gigante et al., 2018)
<b>Gallina domestica (embrión)</b>	0,05 - 0,5 mg / embrión peso	Bisfenol A	Alteraciones meióticas	(Yu et al., 2018)

Fuente: elaboración propia.

Problemas a la salud humana derivados de la interacción con disruptores endócrinos

Como se ha mencionado, los seres humanos se encuentran expuestos a disruptores endócrinos, pues éstos generalmente se transmiten a los humanos a través de productos químicos en el aire y el uso excesivo de productos diarios como plásticos, detergentes, pinturas, cosméticos, muebles, fragancias, lociones, adhesivos, retardantes de flama, limpiadores de superficies, jabones

antibacterianos, textiles, aparatos electrónicos y muchos más. Los efectos a dicha exposición se manifiestan mucho tiempo después de haber tenido contacto con ellos, ya que los DE pueden residir en los tejidos adiposos durante mucho tiempo (Roy et al., 2022). Para comprender la vulnerabilidad y los factores de riesgo de las personas debido a estos compuestos, se analizan publicaciones científicas que aportan datos de la relación del contaminante y sus efectos adversos.

A continuación se presentan cuatro tablas. La tabla 4 muestra los DE que tienen relación en general con la salud humana. La tabla 5 especifica la relación de los DE con la salud de la mujer; el contenido de la tabla 6 se relaciona directamente con la salud del hombre; y la tabla 7 precisa la relación de los DE con el ser humano en desarrollo.

Tabla 4. *Problemas a la salud humana derivados de la interacción con disruptores endócrinos*

DE	Origen	Efectos a la salud humana	Referencia
Benceno (a) pirineo	Productos derivados del petróleo.	Neurotoxina	(Yang et al., 2017)
Cadmio	Como pigmento en pinturas, esmaltes, plásticos, textiles, vidrios, tintas de impresión, caucho, lacas. Aleaciones.	Crecimiento tiroideo retroesternal	(Stojasavljević et al., 2019)
Ftalatos	Producción de plásticos, productos farmacéuticos, cosméticos y productos para el cuidado de la piel.	Cambios en el ritmo circadiano	(Liu et al., 2021a)
Bisfenol AF	Plastificante.	Alteraciones en estrógenos, andrógenos y tiroides	(Skledar et al., 2019)

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. *Problemas a la salud de la mujer derivados de la interacción con disruptores endócrinos*

DE	Origen	Efectos a la salud de la mujer	Referencia
Glifosatos	Herbicida	Riesgo de abortos espontáneos tardíos y disminución de la fecundación.	(Muñoz et al., 2021)
Mercurio	Termómetros y barómetros, pigmentos, cosméticos, pilas, interruptores, detectores de llama, amalgamas dentales y pesticidas	Diabetes mellitus gestacional.	(Jia et al., 2021)

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. *Problemas a la salud del hombre derivados de la interacción con disruptores endócrinos*

DE	Origen	Efectos a la salud del hombre	Referencia
Bisfenoles y ftalatos	Aditivos plásticos y plastificadores	Cáncer de próstata	(Lacouture et al., 2022)
Químicos clorados, bromados y perfluorados	Parafinas, retardantes de llama y aditivos impermeables y antiadherentes	Disminución de la producción de esteroides	(Ahmed et al., 2019).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. *Problemas a la salud del humano en desarrollo derivados de la interacción con disruptores endócrinos.*

DE	Origen	Efectos a la salud del humano en desarrollo	Referencia
Perfluoroalquilo y polifluoroalquilo	Retardantes de llama	Niveles más altos de estrógenos en los recién nacidos.	(Liu et al., 2021b)
Arsénico	Procesamiento de vidrio, pigmentos, textiles, papel, adhesivos metálicos, protectores de la madera y municiones.	Alteraciones en el desarrollo fetal y placentario.	(Meakin et al., 2020)
Ftalatos	Perfumes, plastificantes, pañales, plásticos para envolver alimentos; catéteres, guantes y otros utensilios médicos	Parto prematuro.	(Wu et al., 2021)

Fuente: elaboración propia.

## Marco normativo de los disruptores endócrinos en México

Para la articulación de un marco regulatorio es necesario conocer la jerarquía de leyes mexicanas. El Artículo 133 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece que

esta Constitución, las leyes del Congreso de la Unión que emanen de ella y todos los tratados que estén de acuerdo con la misma, celebrados y que se celebren por el Presidente de la República, con aprobación del Senado, serán la Ley Suprema de toda la Unión. Los jueces de cada entidad federativa se ajustarán a dicha Constitución, leyes y tratados, a pesar de las disposiciones en contrario que pueda haber en las constituciones o leyes de las entidades federativas (Secretaría de Gobernación, 2016).

De lo anterior, la figura 3 desglosa la jerarquía de leyes en México.

Figura 3. *Jerarquía de leyes en México.*



Fuente: elaboración propia con información de Secretaría de Gobernación (2016).

México cuenta con una extensa normatividad de carácter obligatorio, estas normas establecen las características que deben reunir los procesos o servicios cuando estos puedan constituir, entre otras acciones, un riesgo para la seguridad de las personas, dañar la salud humana, deteriorar el medioambiente en general (Secretaría de Salud, 2015).

En México la normalización está establecida en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), las cuales son de carácter obligatorio y son elaboradas por dependencias del Gobierno Federal. Son promovidas por la Secretaría de Economía y el sector privado, y se aplican a través de los Organismos Nacionales de Normalización (Secretaría de Economía, 2019).

Para que las dependencias federales puedan expedir una NOM, la Ley Federal sobre Metrología y Normalización los obliga a formar un comité que denominan Comités Consultivos Nacionales de Normalización, por sus siglas CCNN, quienes elaboran el proyecto de la norma, el cual previamente tiene que estar inscrito en el Programa Nacional de Normalización, que se publica en el Diario Oficial de la Federación para ser objeto de consulta durante un periodo de 60 días, antes de entrar en vigor (Secretaría de Economía, 2019).

No se encontraron registros sobre regulaciones o normativas dirigidas específicamente al término de disruptores endócrinos. Sin embargo, se presenta un abordaje de las leyes, reglamentos y normas que se relacionan con las sustancias tipo DE (las sustancias se clasificaron con base en la tabla 1); se analizaron solo algunas dependencias con la finalidad de conocer si existe relación en las regulaciones mexicanas sobre DE.

Secretaría de Salud

La Secretaría de Salud (SSA) es la dependencia que se encarga de la prevención de enfermedades y promoción de la salud de la población. Establece las políticas de Estado para que la población ejerza su derecho a la protección a la salud. La tabla 8 muestra el marco regulatorio vinculado a la SSA relacionado con DE.

Tabla 8. Marco regulatorio de SSA en relación con los DE

Tipo de regulación	Relación con los DE
Ley General de Salud (DOF 07-06-2024)	Comprende la investigación para salud en términos de conocimiento y control de los efectos nocivos del ambiente en la salud. Establece criterios sanitarios para la fijación de las condiciones particulares de descarga, el tratamiento y uso de aguas residuales.
NOM-035-SSA2-2012, prevención y control de enfermedades en la perimenopausia y postmenopausia de la mujer. Criterios para brindar atención médica (Comité Consultivo Nacional de Normalización, Prevención y Control de Enfermedades, 2013)	Considera una terapia hormonal bajo los criterios de la Guía de Práctica Clínica para la Atención del Climaterio y Menopausia (CENETEC), menciona compuestos progestágenos y estrógenos para el tratamiento del climaterio y menopausia.
NOM-041-SSA2-2011, prevención, diagnóstico, tratamiento, control y vigilancia epidemiológica del cáncer de mama. (DOF 09-06-2011)	Indica que las mujeres candidatas a recibir la terapia hormonal en la peri o postmenopausia por más de cinco años deberán tener una evaluación clínica completa y ser informadas sobre el riesgo mayor de padecer cáncer de mama.

Fuente: elaboración propia.

COFEPRIS

La Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) es un órgano desconcentrado con autonomía administrativa, técnica



y operativa, de conformidad con las disposiciones del Artículo 17 bis de la Ley General de Salud y el Artículo 4° de la Constitución, se encuentra al frente de esta un comisionado federal nombrado por el presidente de México, propuesto por el secretario de salud (COFEPRIS, 2020). La tabla 9 muestra el marco regulatorio vinculado a la COFEPRIS relacionado con DE.

Tabla 9. *Marco regulatorio de COFEPRIS en relación con los DE*

<i>Tipo de regulación</i>	<i>Relación con los DE</i>
Ley Federal para el Control de Precursores Químicos, Productos Químicos Esenciales y Máquinas para Elaborar Cápsulas, Tabletas y/o Comprimidos (DOF 03-05-2023).	La mayoría de las sustancias que controla esta ley se caracterizan por ser DE, por ejemplo, ácido lisérgico, cianuro de bencilo, efedrina, ergometrina, ergotamina, 1-fenil-2-propanona, fenilpropanolamina, entre otras.
Reglamento interior de la Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas (CICOPLAFEST, 1988).	Promover la capacitación de personal técnico en materia de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas y de tratamiento de sus residuos. Generar estudios e investigaciones sobre las características y propiedades de estos productos.
Reglamento en Materia de Registros, Autorizaciones de Importación y Exportación y Certificados de Exportación de Plaguicidas, Nutrientes Vegetales y Sustancias y Materiales Tóxicos o Peligrosos (Secretaría de Gobernación, 2014).	Clasifica los productos cuyo registro se sujetará al procedimiento previsto en este reglamento, dentro de los que se encuentran productos caracterizados por ser DE (incluye un listado).

Fuente: elaboración propia.

## SADER/SENASICA

La vigilancia en el cumplimiento de estas normas corresponde a la Secretaría de Salud a través de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) y a la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), a través del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA, 2020). La tabla 10 muestra el marco regulatorio vinculado a la SENASICA relacionado con DE.

Tabla 10. Marco regulatorio de SENASICA en relación con los DE

Tipo de regulación	Relación con los DE
NOM-082-SAG-FITO/SSA1-2017. Límites máximos de residuos. Lineamientos técnicos y procedimiento de autorización y revisión (SAGARPA, 2017).	Analiza el riesgo de residuos de plaguicidas en agua, porcentaje de cultivo tratado, factor de procesamiento del alimento, intervalos de seguridad mayores y/o dosis de aplicación menores, entre otros.
NOM-012-ZOO-1993, Especificaciones para la regulación de productos químicos, farmacéuticos, biológicos y alimenticios para uso en animales o de consumo por éstos (SAGARPA, 2004).	Considera que la aplicación correcta de los productos y la observancia del tiempo de retiro de estos en los animales disminuirá el riesgo que representa para la salud humana; y que la información comercial proporcionada en el etiquetado de los productos garantizará su uso y manejo adecuado.
NOM-064-ZOO-2000, Lineamientos para la clasificación y prescripción de productos farmacéuticos veterinarios por el nivel de riesgo de sus ingredientes activos (SAGARPA, 2003).	Define en tres grupos los productos farmacéuticos veterinarios; los productos del grupo 1 (al que pertenecen gran parte de los DE) únicamente se pueden adquirir con receta cuantificada. Los productos del grupo 2 (en donde también se encuentran DE) se podrán adquirir únicamente con receta médica que indique la cédula profesional del médico.

Fuente: elaboración propia.

SEMARNAT

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la encargada de diseñar, planear, ejecutar y coordinar las políticas públicas en materia de recursos naturales, ecología, saneamiento ambiental, agua, pesca y sustentabilidad urbana. Lo anterior incluye la protección, restauración y conservación de los ecosistemas; asesorar al resto del gabinete para que, en el ámbito de sus responsabilidades, se conduzcan con apego al concepto de desarrollo sustentable (SEMARNAT, 2018). La Tabla 11 muestra el marco regulatorio vinculado a la SEMARNAT relacionado con DE.

Tabla 11. Marco regulatorio de SEMARNAT en relación con los DE

Tipo de regulación	Relación con los DE
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (DOF 14-11-2025).	La regulación y el control de las actividades consideradas como altamente riesgosas, y de la generación, manejo y disposición final de materiales y residuos peligrosos para el ambiente o los ecosistemas.

<i>Tipo de regulación</i>	<i>Relación con los DE</i>
Ley Federal para el Control de Sustancias Químicas Susceptibles de Desvío para la Fabricación de Armas Químicas (DOF 14-11-2025).	Contiene un listado de sustancias, si se realiza alguna actividad con las sustancias del listado se debe proceder según el Registro Nacional para el Control de Sustancias Químicas, declarado en esta Ley.
Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (DOF 14-11-2025).	Las actividades que implican la generación o manejo de sustancias caracterizadas por ser DE, entre otras sustancias.
NOM-003-SEMARNAT-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público (DOF 21-09-1998).	Establece que el agua residual tratada reusada en servicios al público no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos.
NOM-001-SEMARNAT-2021. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (SEMARNAT, 2022).	Establece los límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros, así como, la frecuencia con la que se deben realizar las muestras para determinar los límites máximos permisibles de los contaminantes.
NOM-002-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (SEMARNAP, 1998).	Establece los límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros. Establece la frecuencia con la que se deben realizar las muestras para determinar los límites máximos permisibles de los contaminantes.

Fuente: elaboración propia.

## Temas innovadores sobre disruptores endócrinos

Los estudios de frontera actuales sobre disruptores endocrinos (DE) se centran en comprender mejor su impacto en la salud humana y el medioambiente, así como en desarrollar estrategias para su detección, monitoreo y mitigación. En la tabla 12, se detallan algunas de las líneas de investigación emergentes y los desafíos actuales.

Tabla 12. Líneas de investigación emergentes y desafíos actuales de los DE

1	Identificación y caracterización de nuevos DE	Químicos eternos (PFAS)
		Mezclas de DE
		DE emergentes
2	Mecanismos de acción y efectos a bajas dosis	Impacto epigenético
		Ventanas de vulnerabilidad
		Efectos no monótonos
3	Salud humana	Impacto en la microbiota
		Salud reproductiva
		Cáncer
		Neurodesarrollo
		Obesidad y trastornos metabólicos
4	Salud ambiental y ecosistemas	Sistema inmune
		Biomonitoreo
		Impacto en la vida silvestre
5	Desarrollo de herramientas y políticas	Estrategias de mitigación
		Nuevos biomarcadores
		Modelos computacionales y de inteligencia artificial
		Marcos regulatorios

Fuente: Secretaría de Salud (2011), SADER (2020), European Commission (2020), Streifer y Gore (2021), Hilz y Gore (2023), Kortenkamp y Faust (2023).

Es crucial identificar los puntos más relevantes e innovadores para destacar la vanguardia en el estudio de los disruptores endocrinos. Los temas que representan la frontera de la investigación y las discusiones más innovadoras en México y a nivel global sobre DE se pueden observar en la tabla 13.

Tabla 13. Temas de frontera en la investigación de los DE

El desafío de las bajas dosis y las curvas dosis-respuesta no monótonas	
Exposición a mezclas de DE: efectos combinados y sinergias	
Implicaciones epigenéticas y transgeneracionales	
El concepto de “obesógenos”	
Microplásticos y nanoplásticos como vehículos y fuentes de DE	
Nuevas estrategias de identificación y cribado ( <i>screening</i> )	Métodos <i>in vitro</i> de alto rendimiento ( <i>high-throughput screening</i> )
	Modelos computacionales y de inteligencia artificial (toxicología predictiva)
Biomonitoreo avanzado y nuevos biomarcadores	
Marco regulatorio internacional (especialmente UE y OCDE)	
Temas más relevantes e innovadores específicos de México	
Salud reproductiva	
Obesidad y trastornos metabólicos	
Bioacumulación y biomagnificación en la cadena alimentaria	

La Regulación de DE en México (avances concretos)	Prohibición y restricción de plásticos de un solo uso y BPA (leyes estatales)
	Decreto presidencial sobre glifosato y maíz transgénico
	Salud y seguridad ocupacional (ej. reconocimiento explícito de DE en la NOM-047-SSA1-2011)

Fuente: Secretaría de Salud (2011), SADER (2020), European Commission (2020), Streifer y Gore (2021), Barr et al. (2023), Hilz y Gore (2023), Janesick y Blumberg (2023), Judson et al. (2023), Kortenkamp y Faust (2023), Nilsson et al. (2023), Rochman et al. (2023), Zoeller et al. (2023), Heindel et al. (2024), Hewitt et al. (2024), Lou et al. (2024), Mani y Sifakis (2024), Tran et al. (2024).

## Conclusiones

Para mitigar la contaminación por DE presentes en aguas residuales se necesita llegar al origen de su generación, la mayoría de los productos tipo DE están contenidos en fármacos, por lo que es indispensable contar con un marco normativo que regule el consumo de productos que contengan estas sustancias, principalmente los productos fármacos.

El estudio del marco normativo en materia de DE permite llegar a la conclusión de que en México hay normatividad vigente relacionada con estos contaminantes, sin embargo, es necesario fortalecer estas normas.

Una de las principales preocupaciones por la contaminación de DE es la interacción no regulada del humano en desarrollo, ya que los efectos nocivos a la salud pueden tener consecuencias a lo largo de toda su existencia, disminuye su calidad de vida y compromete la salud de su progeñie.

Existe suficiente evidencia científica que sustenta la importancia de seguir estudiando la contaminación por DE, por lo que en México se debe conformar una comisión que tenga como objetivo mitigar la contaminación por DE. Para tener una cimentación sólida de lo estudiado y cumplir con su objetivo es necesario se cumpla con una serie de pasos que se proponen a continuación:

1. Desarrollar métodos de análisis sensibles y confiables para determinar si una sustancia es DE, y analizar su toxicidad.
2. Identificar los compuestos DE en el medioambiente, generar matrices ambientales que determinen los niveles de contaminación y el impacto en la flora y fauna de las zonas geográficas identificadas como contaminadas por estas sustancias.

3. Determinar el riesgo de exposición con los datos del punto uno y dos y realizar una escala de los riesgos en diferentes etapas de la vida del humano.
4. Integrar la evidencia generada en los puntos anteriores para dilucidar los mecanismos de acción de los DE: la articulación de los datos analíticos, ambientales y de exposición permite identificar y comprender los mecanismos mediante los cuales estas sustancias ejercen sus efectos biológicos.
5. Compartir en una base de datos los hallazgos de los puntos anteriores, generar un análisis de riesgo de cada una de las sustancias consideradas como DE, y compartir a nivel mundial los datos.
6. Con base en los puntos anteriores, monitorear las aguas y priorizar las que serán monitoreadas según su contacto directo con los humanos y la fauna.
7. Articulación de normatividad, para construir un marco normativo que contemple factores como límites máximos permisibles de contaminantes DE, venta de fármacos hormonales solo bajo prescripción médica, plásticos libres de DE, por mencionar algunos factores.
8. Sistemas de degradación de contaminantes DE, para establecer métodos para la degradación de contaminantes DE que se puedan aplicar en las aguas de México.
9. Programas de concientización a la población, para divulgar la información científica en un lenguaje simplificado para concientizar a la población sobre el riesgo por contaminación de DE, con énfasis en los problemas de automedicación, el riego de cultivos con aguas residuales y la disposición final de fármacos.

## Referencias

- Agirrezabala, J. R. (2016). Farmacontaminación. Impacto ambiental de los medicamentos. *Boletín Infac*, 24(10), 60-4. ISSN: 1575054-X
- Ahmed, K. E. M., Frøysa, H. G., Karlsen, O. A., Blaser, N., Zimmer, K. E., Berntsen, H. F., Verhaegend, S., Ropstadd, E., Kellmannf, R. y Goksøyr, A. (2019). Effects of defined mixtures of POPs and endocrine disruptors on the steroid metabolome of the hu-

- man H295R adrenocortical cell line. *Chemosphere*, 218, 328-339. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.057>
- Arguello-Pérez, M. Á., Mendoza-Pérez, J. A., Tintos-Gómez, A., Ramírez-Ayala, E., Godínez-Domínguez, E. y Silva-Bátiz, F. D. A. (2019). Ecotoxicological analysis of emerging contaminants from wastewater discharges in the Coastal Zone of Cihuatlán (Jalisco, Mexico). *Water*, 11(7), 1386.
- Babalola, O. O. y van Wyk, H. J. (2021). Exposure Impacts of Diquat dibromide herbicide formulation on amphibian larval development. *Heliyon*, 7(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06700>
- Bergman, Å., Heindel, J. J., Jobling, S., Kidd, K. A. y Zoeller, R. T. (2012). *State of the science of endocrine disrupting chemicals 2012. Summary of Decision-makers*. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/78102>
- Chávez-Mejía, A. C., Navarro-González, I., Magaña-López, R., Uscanga-Roldán, D., Zaragoza-Sánchez, P. I. y Jiménez-Cisneros, B. E. (2019). Presence and natural treatment of organic micropollutants and their risks after 100 years of incidental water reuse in agricultural irrigation. *Water*, 11(10), 2148.
- Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios [COFEPRIS]. (2020). *Marco jurídico de la COFEPRIS*. <https://transparencia.cofepri.s.gob.mx/index.php/es/marco-juridico>
- Comisión Nacional del Agua [Conagua]. (2020). *Uso del agua en México 2020*. Conagua. <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/UsosAgua/#/>
- Comisión Nacional del Agua [Conagua]. (2022). *Estadísticas del Agua en México 2021*. Conagua. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf>
- Demeneix, B. y Slama, R. (2020). *Endocrine disruptors: from scientific evidence to human health protection*. European Parliament Research Service. <https://policycommons.net/artifacts/1335366/endocrine-disruptors/1941828/>
- Diario Oficial de la Unión Europea. Unión Europea. (2017). *Reglamento delegado (UE) 2017/2100 de la comisión de 4 de septiembre de 2017 por el que se establecen los criterios científicos para la determinación de las propiedades de alteración endocrina de conformidad con el Reglamento (UE) n.o 528/2012 del Parlamento Europeo y del Consejo*. Diario Oficial de la Unión Europea 17.11.2017. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R2100&from=PT>
- Diario Oficial de la Unión Europea. Unión Europea. (2018). *Reglamento (UE) 2018/605 de la comisión de 19 de abril de 2018 por el que se modifica el anexo II del Reglamento (CE) n.o 1107/2009 al establecer criterios científicos para la determinación de las propiedades de alteración endocrina*. Diario Oficial de la Unión Europea 20.4.2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0605>
- DOF (2021) Ley Federal de Responsabilidad Ambiental de 2013. La presente Ley regula la responsabilidad ambiental que nace de los daños ocasionados al ambiente, así como la reparación y compensación de dichos daños cuando sea exigible a través de los procesos judiciales federales previstos por el artículo 17 constitucional, los mecanismos alternativos de solución de controversias, los procedimientos

administrativos y aquellos que correspondan a la comisión de delitos contra el ambiente y la gestión ambiental. 7 de junio de 2013. Última Reforma DOF 14-11-2025. [https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFRA\\_200521.pdf](https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFRA_200521.pdf)

DOF (2023) Ley Federal para el Control De Precusores Químicos, Productos Químicos Esenciales y Máquinas Para Elaborar Cápsulas, Tabletas y/o Comprimidos de 1997. La presente Ley es de orden público, de interés general y de observancia en todo el territorio nacional. Tiene por objeto controlar la producción, preparación, enajenación, adquisición, importación, exportación, transporte, almacenaje y distribución de precursores químicos, productos químicos esenciales y máquinas para elaborar cápsulas, tabletas o comprimidos, a través de la coordinación interinstitucional para prevenir, detectar y evitar su desvío o uso para la producción de drogas sintéticas. 26 de diciembre de 1997. Última Reforma DOF 03-05-2023. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFCPQ.pdf>

DOF (2024) Ley Federal para el Control de Sustancias Químicas Susceptibles de Desvío para la Fabricación de Armas Químicas de 2009. La presente Ley es de orden público y de observancia general en el territorio de la República y áreas bajo la jurisdicción del Estado mexicano, y tiene por objeto establecer medidas de control a los sujetos obligados que realicen Actividades Reguladas relacionadas con las sustancias químicas susceptibles de desvío, así como respecto de las instalaciones, tecnología, equipo especializado y corriente utilizado para dichas actividades. 9 de junio del 2009. Última Reforma DOF 14-11-2025. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LFCSQ.pdf>

DOF (2024) Ley General de Salud de 1984. La presente ley reglamenta el derecho a la protección de la salud que tiene toda persona en los términos del artículo 4o. de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, establece las bases y modalidades para el acceso a los servicios de salud, distribuye competencias y establece los casos de concurrencia entre la Federación y las entidades federativas en materia de salubridad general. 07 de febrero de 1984. Última Reforma DOF 07-06-2024. [https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf\\_mov/Ley\\_General\\_de\\_Salud.pdf](https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf_mov/Ley_General_de_Salud.pdf)

DOF (2024) Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente de 1988. La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. 28 de enero de 1988. Última Reforma DOF 14-11-2025. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>

DOF Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas [CICOPLAFEST]. (1988). *Reglamento Interior de la comisión intersecretarial para el control del proceso y uso de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas*. DOF el 27 de octubre de 1988. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/pdf/wo88741.pdf>



- DOF Comité Consultivo Nacional de Normalización, Prevención y Control de Enfermedades. (2013). *Norma Oficial Mexicana NOM-035-SSA2-2012, para la prevención y control de enfermedades en la perimenopausia y postmenopausia de la mujer. Criterios para brindar atención médica*. DOF: 07/01/2013. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5284235&fecha=07/01/2013#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5284235&fecha=07/01/2013#gsc.tab=0)
- DOF Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER]. (2020). Decreto por el que se establecen diversas disposiciones en materia de uso y consumo de glifosato y de maíz genéticamente modificado. Publicado el 31 de diciembre de 2020.
- DOF Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2004). *Modificación a la Norma Oficial Mexicana. NOM-012-ZOO-1993, especificaciones para la regulación de productos químicos, farmacéuticos, biológicos y alimenticios para uso en animales o consumo por éstos*. DOF 27 de enero del 2004. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/202293/Modificaci\\_n\\_C\\_NOM-012-ZOO-1993\\_270104.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/202293/Modificaci_n_C_NOM-012-ZOO-1993_270104.pdf)
- DOF Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2003). *Norma Oficial Mexicana. NOM-064-ZOO-2000, lineamientos para la clasificación y prescripción de productos farmacéuticos veterinarios por el nivel de riesgo de sus ingredientes activos*. DOF 27 de enero del 2003. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/203504/NOM-064-ZOO-2000\\_270103.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/203504/NOM-064-ZOO-2000_270103.pdf)
- DOF Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2017). *Norma Oficial Mexicana NOM-082-SAG-FITO/SSA1-2017. Límites máximos de residuos. Lineamientos técnicos y procedimiento de autorización y revisión*. DOF: 04/10/2017. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5499806&fecha=04/10/2017#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5499806&fecha=04/10/2017#gsc.tab=0)
- DOF Secretaría de Gobernación. (2014). *Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones del Reglamento en Materia de Registros, Autorizaciones de Importación y Exportación y Certificados de Exportación de Plaguicidas, Nutrientes Vegetales y Sustancias y Materiales Tóxicos o Peligrosos*. DOF: 13/02/2014. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5332473&fecha=13/02/2014#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5332473&fecha=13/02/2014#gsc.tab=0)
- DOF Secretaría de Gobernación. (2016). *Decreto por el que se declaran reformadas y derogadas diversas disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en materia de la reforma política de la Ciudad de México*. DOF: 29/01/2016. [https://www.dof.gob.mx/index\\_113.php?year=2016&month=01&day=29](https://www.dof.gob.mx/index_113.php?year=2016&month=01&day=29)
- DOF Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2022). *Norma Oficial Mexicana. NOM-001-SEMARNAT-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*. DOF: 11/03/2022. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0)
- DOF Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca [SEMARNAP]. (1988). *Norma Oficial Mexicana. NOM-002-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal*. DOF: 03/06/1998. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#gsc.tab=0)

- DOF Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1998). *Norma Oficial Mexicana. NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público*. DOF: 21/09/1998. [http://diariooficial.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4893449&fecha=21/09/1998#gsc.tab=0](http://diariooficial.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4893449&fecha=21/09/1998#gsc.tab=0)
- Estrada-Arriaga, E. B., Cortés-Muñoz, J. E., González-Herrera, A., Calderón-Mólgora, C. G., de Lourdes Rivera-Huerta, M., Ramírez-Camperos, E. y García-Sánchez, L. (2016). Assessment of full-scale biological nutrient removal systems upgraded with physico-chemical processes for the removal of emerging pollutants present in wastewaters from Mexico. *Science of the Total Environment*, 571, 1172-1182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.118>
- European Commission. (2020). *Chemicals Strategy for Sustainability Towards a Toxic-Free Environment*. COM.
- Félix-Cañedo, T. E., Durán-Álvarez, J. C. y Jiménez-Cisneros, B. (2013) The occurrence and distribution of a group of organic micropollutants in Mexico City's water sources. *Science of the Total Environment*, 454-455, 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.088>
- Ferreira, M. F., Nostro, F. L. L., Fernández, D. A. y Genovese, G. (2021). Endocrine disruption in the sub-Antarctic fish Patagonotothen tessellata (Perciformes, Nototheniidae) from Beagle Channel associated to anthropogenic impact. *Marine Environmental Research*, 171, 101-118. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2021.105478>
- Flaws, J., Damdimopoulou, P., Patisaul, H. B., Gore, A., Raetzman, L. y Vandenberg, L. N. (2020) Plásticos, salud, y perturbadores endócrinos, guía sobre sustancias químicas perturbadoras del sistema endocrino y plásticos para organizaciones de interés público y formuladores de políticas. Sociedad de Endocrinología. <https://ipen.org/documents/plastics-edcs-health>
- Gao, X., Kang, S., Xiong, R. y Chen, M. (2020). Environment-friendly removal methods for endocrine disrupting chemicals. *Sustainability*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/su12187615>
- Gigante, P., Berni, M., Bussolati, S., Grasselli, F., Grolli, S., Ramoni, R., y Basini, G. (2018). Glyphosate affects swine ovarian and adipose stromal cell functions. *Animal reproduction science*, 195, 185-196. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2018.05.023>
- Heindel, J. J., & Blumberg, B. (2019). Environmental obesogens: Mechanisms and controversies. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 59, 89-106. <https://doi.org/10.1146/annurev-pharmtox-010818-021304>
- Hewitt, M. Mark T. D. Cronin, Steven J. Enoch, James W. Firman, Judith C. Madden, and Andrew P. Worth. (2024). Artificial intelligence in toxicology: Current status and future applications for endocrine disruptor research. *Computational Toxicology*, 30, 100295. <https://doi.org/10.1016/j.comtox.2023.100295>
- Hilz, E. N. y Gore, A. C. (2023). Endocrine-Disrupting Chemicals: Science and Policy. *Policy insights from the behavioral and brain sciences*, 10(2), 142-150. <https://doi.org/10.1177/23727322231196794>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [INEGI]. (2020). *Censo de Población y Vivienda. Población total*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>
- International Programme on Chemical Safety. (2002). *Global assessment on the state of the science of endocrine disruptors*. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/67357>
- Janesick, A. S. y Blumberg, B. (2023). Obesogens: An update on environmental chemicals that promote weight gain. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 36, 100494.
- Jia, X., Zhang, L., Zhao, J., Ren, M., Li, Z., Wang, J. y Ye, R. (2021). Associations between endocrine-disrupting heavy metals in maternal hair and gestational diabetes mellitus: A nested case-control study in China. *Environment International*, 157, 106-110. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106770>
- Judson R. S., Magpantay F. M., Chickarmane V., Haskell C., Tania N., Taylor J., Xia M., Huang R., Rotroff D. M., Filer D. L., et al. (2015). Integrated model of chemical perturbations of a biological pathway using 18 in vitro high-throughput screening assays for the estrogen receptor. *Toxicol. Sci.* 148, 137–154. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfv168>
- Kortenkamp, A. y Faust, M. (2023). Combined effects of endocrine disruptors: Current evidence and future challenges. *Environmental Health Perspectives*, 131(6), 065001.
- Lacouture, A., Lafront, C., Peillex, C., Pelletier, M. y Audet-Walsh, É. (2022). Impacts of endocrine-disrupting chemicals on prostate function and cancer. *Environmental Research*, 204, 112-155. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112085>
- Lesser, L. E., Mora, A., Moreau, C., Mahlkecht, J., Hernández-Antonio, A., Ramírez, A. I. y Barrios-Pina, H. (2018) Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system: Mezquital Valley, Mexico. *Chemosphere*, 198, 510-521. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.154>
- Liu, H., Pan, Y., Jin, S., Sun, X., Jiang, Y., Wang, Y. y Xu, S. (2021b). Associations between six common per-and polyfluoroalkyl substances and estrogens in neonates of China. *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124-178. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124378>
- Liu, W., Cao, H., Liao, S., Kudlak, B., Williams, M. J. y Schiöth, H. B. (2021a). Dibutyl phthalate disrupts conserved circadian rhythm in *Drosophila* and human cells. *Science of the Total Environment*, 783, 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147038>
- López-Velázquez, K., Guzmán-Mar, J. L., Saldarriaga-Noreña, H. A., Murillo-Tovar, M. A., Hinojosa-Reyes, L., & Villanueva-Rodríguez, M. (2021). Occurrence and seasonal distribution of five selected endocrine-disrupting compounds in wastewater treatment plants of the Metropolitan Area of Monterrey, Mexico: the role of water quality parameters. *Environmental Pollution*, 269, 116223.
- Lou, Z., et al. (2024). Multi-exposure to environmental chemicals and human health outcomes: A review of recent advancements in exposomics. *Journal of Hazardous Materials*, 462, 132474.

- Mani, C. R. y Sifakis, S. (2024). Epigenetic reprogramming by endocrine-disrupting chemicals: Current understanding and future directions. *Environmental Research*, 240, 117498.
- Marlatt, V. L., Bayen, S., Castaneda-Cortès, D., Delbès, G., Grigorova, P., Langlois, V. S. y van Der Kraak, G. (2022). Impacts of endocrine disrupting chemicals on reproduction in wildlife and humans. *Environmental Research*, 208, 112584.
- Mathew, S., Ganguly, P., Kumaravel, V., Bartlett, J. y Pillai, S. C. (2020). Solar lightinduced photocatalytic degradation of pharmaceuticals in wastewater treatment. En P. Singh, A. Borthakur, P. K. Mishra y D. Tiwary (Eds.). *Nano-Materials as Photocatalysts for Degradation of Environmental Pollutants. Challenges and Possibilities* (pp. 65-78). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818598-8.00004-3>
- Meakin, C. J., Szilagyi, J. T., Avula, V. y Fry, R. C. (2020). Inorganic arsenic and its methylated metabolites as endocrine disruptors in the placenta: Mechanisms underpinning glucocorticoid receptor (GR) pathway perturbations. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 409, 115305. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2020.115305>
- Muñoz, J. P., Bleak, T. C. y Calaf, G. M. (2021). Glyphosate and the key characteristics of an endocrine disruptor: A review. *Chemosphere*, 270, 128-149. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128619>
- Nilsson, E. E. et al. (2023). Endocrine disruptor exposure leading to transgenerational disease. *Current Environmental Health Reports*, 10(4), 427-438.
- Ojemaye, C. Y. y Petrik, L. (2019). Occurrences, levels and risk assessment studies of emerging pollutants (pharmaceuticals, perfluoroalkyl and endocrine disrupting compounds) in fish samples from Kalk Bay harbour, South Africa. *Environmental pollution*, 252, 562-572. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.091>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2018). *Agua saneamiento e higiene*. [https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/emerging/info\\_sheet\\_pharmaceuticals/e](https://www.who.int/water_sanitation_health/emerging/info_sheet_pharmaceuticals/e)
- Ortiz-Villanueva, E., Jaumot, J., Martínez, R., Navarro-Martín, L., Piña, B. y Tauler, R. (2018). Assessment of endocrine disruptors effects on zebrafish (*Danio rerio*) embryos by untargeted LC-HRMS metabolomic analysis. *Science of the Total Environment*, 635, 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.369>
- Pérez-Alvarez, I., Islas-Flores, H., Gómez-Oliván, L. M., Barceló, D., De Alda, M. L., Solsona, S. P. y Galar-Martínez, M. (2018). Determination of metals and pharmaceutical compounds released in hospital wastewater from Toluca, Mexico, and evaluation of their toxic impact. *Environmental Pollution*, 240, 330-341. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.116>
- Quiros-Alcala, L., & Barr, D. B. (2023). Invited perspective: Mixtures — Are they worth the risk (assessment)? *Environmental Health Perspectives*, 131(4), 041301. <https://doi.org/10.1289/EHP12596>
- RISCTOX. (2018). *Base de datos de sustancias tóxicas y peligrosas RISCTOX*. Gobierno de España. [http://risctox.istas.net/dn\\_risctox\\_ficha\\_sustancia.asp?id\\_sustancia=1060938](http://risctox.istas.net/dn_risctox_ficha_sustancia.asp?id_sustancia=1060938)
- Rochman, C. M. et al. (2023). The global issue of plastic pollution: Implications for human health and endocrine disruption. *Environmental Health Perspectives*, 131(11), 115001.

- Roy, S., Garg, A., Garg, S. y Tran, T. A. (2022). *Advanced Industrial Wastewater Treatment and Reclamation of Water. Environmental Science and Engineering*. Springer.
- Secretaría de Economía. (2019). *¿Sabes qué es la normalización?* Gobierno de México. <https://www.gob.mx/se/articulos/sabes-que-es-la-normalizacion-192107?idiom=es>
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1998). *Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público*. Diario Oficial de la Federación. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4896955&fecha=21/09/1998](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4896955&fecha=21/09/1998)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2018). *Municipios y delegaciones con tratamiento de aguas residuales municipales que reportan la generación y tratamiento de lodos residuales*. SEMARNAT. [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio\\_2018/dgeiawf.semarnat.gob.mx\\_8080/ibi\\_apps/WF-Servletd7ab.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2018/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WF-Servletd7ab.html)
- Secretaría de Salud. (2011). *Norma Oficial Mexicana NOM-041-SSA2-2011, para la prevención, diagnóstico, tratamiento, control y vigilancia epidemiológica del cáncer de mama*. Diario Oficial de la Federación. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5194157&fecha=09/06/2011](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5194157&fecha=09/06/2011)
- Secretaría de Salud. (2015). *Normas Oficiales Mexicanas*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/salud/en/documentos/normas-oficiales-mexicanas-9705>
- Semerád, J., Horká, P., Filipová, A., Kukla, J., Holubová, K., Musilová, Z. y Cajthaml, T. (2021). The driving factors of per-and polyfluorinated alkyl substance (PFAS) accumulation in selected fish species: The influence of position in river continuum, fish feed composition, and pollutant properties. *Science of The Total Environment*, 816. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151662>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria [SENASICA]. (2020). *¿Qué hacemos?* Gobierno de México. <https://www.gob.mx/senasica/que-hacemos>
- Siemens, J., Huschek, G., Siebe, C. y Kaupenjohann, M. (2008). Concentrations and mobility of human pharmaceuticals in the world's largest wastewater irrigation system, Mexico City–Mezquital Valley. *Water Research*, 42(8-9), 2124-2134. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.11.019>
- Skledar, D. G., Carino, A., Trontelj, J., Troberg, J., Distrutti, E., Marchianò, S. y Mašič, L. P. (2019). Endocrine activities and adipogenic effects of bisphenol AF and its main metabolite. *Chemosphere*, 215, 870-880. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.129>
- Stojasavljević, A., Rovčanin, B., Krstić, Đ., Jagodić, J., Borković-Mitić, S., Paunović, I. y Manojlović, D. (2019). Cadmium as main endocrine disruptor in papillary thyroid carcinoma and the significance of Cd/Se ratio for thyroid tissue pathophysiology. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 55, 190-195. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2019.06.009>

- Streifer M. y Gore A. C. (2021). Chapter Three - Epigenetics, estrogenic endocrine-disrupting chemicals (EDCs), and the brain. En L. N. Vandenberg y J. L. Turgeon (Eds.). *Advances in Pharmacology* (pp. 73-99). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.apha.2021.03.006>
- Tenorio-Chávez, P., Cerro-López, M., Castro-Pastrana, L. I., Ramírez-Rodrigues, M. M., Orozco-Hernández, J. M. y Gómez-Oliván, L. M. (2020). Effects of effluent from a hospital in Mexico on the embryonic development of zebrafish, *Danio rerio*. *Science of the Total Environment*, 727, 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138716>
- Tetzlaff, C. N. R., Ramhøj, L., Lardenois, A., Axelstad, M., Evrard, B., Chalmel, F. y Svingen, T. (2021). Adult female rats perinatally exposed to perfluorohexane sulfonate (PFHxS) and a mixture of endocrine disruptors display increased body/fat weights without a transcriptional footprint in fat cells. *Toxicology Letters*, 339, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2020.12.018>
- Tran, L. et al. (2024). Omics technologies for the identification of endocrine disrupting chemical-induced biomarkers: A comprehensive review. *Environment International*, 183, 108396.
- Wu, Y., Wang, J., Wei, Y., Chen, J., Kang, L., Long, C., Wu, S., Shen, L. y Wei, G. (2021). Maternal exposure to endocrine disrupting chemicals (EDCs) and preterm birth: A systematic review, meta-analysis, and meta-regression analysis. *Environmental Pollution*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118264>
- Yang, K., Jiang, X., Su, Q., Wang, J., Li, C., Xia, Y. y Tu, B. (2017). Disruption of glutamate neurotransmitter transmission is modulated by SNAP-25 in benzo [a] pyrene-induced neurotoxic effects. *Toxicology*, 384, 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2017.03.021>
- Yu, M., Xu, Y., Li, M., Li, D., Lu, Y., Yu, D. y Du, W. (2018). Bisphenol A accelerates meiotic progression in embryonic chickens via the estrogen receptor  $\beta$  signaling pathway. *General and Comparative Endocrinology*, 259, 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2017.11.004>
- Zoeller, R. T. et al. (2023). Endocrine disrupting chemicals: From basic research to policy actions. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 576, 111979.

## 9. Tratamiento de los residuos peligrosos del sector hidrocarburos (RPSH) en México generados en las operaciones de producción de petróleo y gas



RAÚL EDUARDO CASTAÑEDA GONZÁLEZ\*

JUAN ALBERTO ALCÁNTARA CÁRDENAS\*\*

JAIME ALEJANDRO GUEVARA VALDEZ\*\*\*

<https://doi.org/10.52501/cc.364.09>

### Resumen

Los residuos peligrosos del sector de hidrocarburos (RPSH) en México representan riesgos significativos para el medioambiente y la salud. En la región petrolera conocida como la Faja de Oro, que incluye Tamaulipas, Veracruz y Tabasco, no existe un control ni inventario actualizado sobre la generación y disposición de estos residuos. Se generan en diversas etapas, como la exploración, producción y refinación, y su manejo es deficiente. Este análisis aborda la clasificación, manejo y disposición de los RPSH, y compara el marco legal vigente con la realidad de las operaciones en el sector. Se concluye que las leyes mexicanas en esta área no se ajustan a las prácticas actuales de la industria, y algunas normativas son obsoletas. Además, los residuos varían según la operación, siendo distintos los producidos en perforación y *fracking*. Finalmente, se propone una clasificación más precisa de los residuos basada en el tipo de operación, con el fin de mejorar su gestión y reducir los impactos negativos.

---

\* Maestrante en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6122-5673> ; correo electrónico: rcastanedag2200@alumno.ipn.mx

\*\* Doctor en Metalurgia y Materiales. Profesor-investigador en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2056-2698> ; Scopus: 14831065400

\*\*\* Doctor en Ciencias del Medio Ambiente y de la Sustentabilidad. Profesor en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9546-9308>

**Palabras clave:** *residuos peligrosos; petróleo; gas; contaminación por hidrocarburos; industria extractiva.*

## Introducción

Las operaciones del sector petróleo en México son de numerosos tipos, como la prospección, perforación, *fracking*, reparación, entre otras. Por lo que la industria petrolera en México genera un aproximado de 1.7 millones de toneladas anuales de residuos, de las cuales 13 % se consideran peligrosos, de los cuales solo 0.1 % son reciclados y 11 % serán reutilizados (CENAPRED, 2005). Las fuentes de generadoras de residuos del sector petrolero más comunes son los siguientes:

- Lodos de perforación de tipo inversa y recortes
- Suelo contaminado por derrames de tuberías corroídas
- Tiraderos de desechos semisólidos
- Sitios contaminados por descargas de petroquímicas y refinerías

Estas fuentes no están categorizadas según el tipo de operación, pero el hacer una clasificación de acuerdo con el tipo actividad en el sector hidrocarburos (SH) brindaría un mayor panorama del tipo de residuo generado que predominará (Schroeder et al., 1999). El *fracking* es una de las actividades más contaminantes que causa daños medioambientales por el uso de grandes volúmenes de agua, sustancias químicas y los apuntalantes; una vez que se inyectan a la formación rocosa donde está el petróleo, estos fluidos y residuos no retornan en su totalidad a la superficie contaminado el subsuelo y los mantos acuíferos.

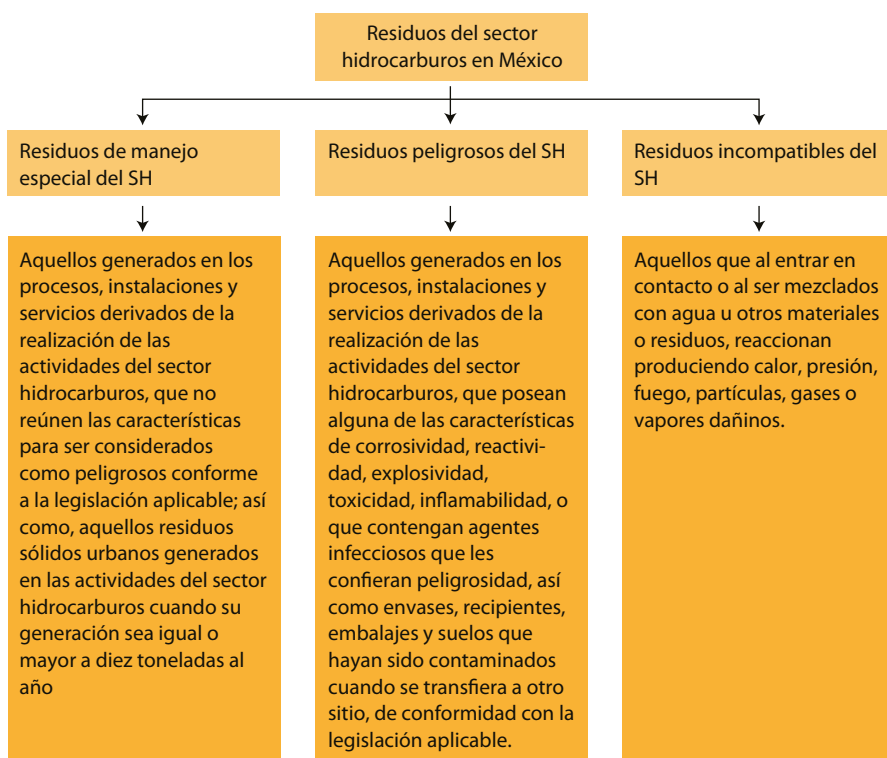
Los residuos del SH tienen una clasificación similar a los residuos peligrosos (RP), sin embargo, los del SH son regulados por la ASEA (Agencia de Seguridad Energía y Medio Ambiente), un órgano desconcentrado de la SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) que regula y supervisa la seguridad industrial, seguridad operativa y protección al ambiente respecto de las actividades del sector hidrocarburos.



## Especificaciones para el manejo de residuos generados

Los residuos generados en el SH en México de acuerdo con la ASEA son denominados residuos peligrosos del sector hidrocarburos (RPSH) y se clasifican como se ilustra en la figura 1.

Figura 1. Clasificación de los residuos del SH



Fuente: Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (2020).

Los RPSH también poseen características CRETIB (corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, biológico-infecciosos) al igual que los RP, pero los RPSH son producidos por las siguientes actividades consideradas como actividades del SH dentro de la Ley de la ASEA (LANSI) en 2014 (tabla 1):

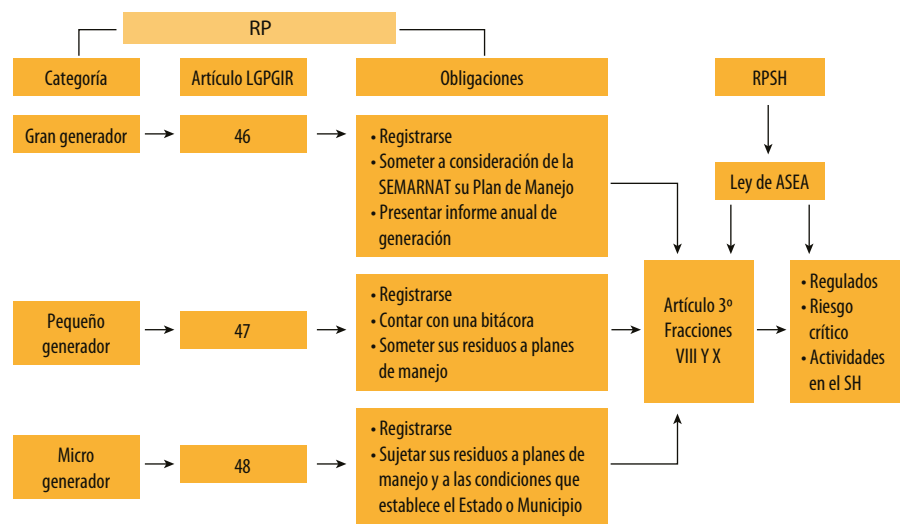
Tabla 1. *RPSH producidos en las actividades del SH, según la Ley de la ASEA*

Actividades del SH que producen RPSH	
a. El reconocimiento y exploración superficial, la exploración y extracción de hidrocarburos	d. El transporte, almacenamiento, distribución y expendio de gas licuado de petróleo
b. El tratamiento, refinación, enajenación, comercialización, transporte y almacenamiento	e. El transporte, almacenamiento, distribución y expendio al público de petrolíferos
c. El procesamiento, comprensión, licuefacción, descompresión y regasificación, así como el transporte, almacenamiento, distribución y expendio de gas natural	f. El transporte por ducto y el almacenamiento, que se encuentre vinculado a ductos de petroquímicos producto del procesamiento del gas natural y de la refinación del petróleo

Fuente: elaboración propia.

Se debe tomar en cuenta que los residuos producidos según el tipo de actividad del SH son diferentes, no se utilizan las mismas materias en operaciones diferentes y no serán las mismas materias durante todo el procedimiento de la actividad. Por ejemplo, el uso de fluidos de perforación como la bentonita es usado en el inciso a, pero este fluido no es utilizado en el *fracking*, por lo que no hay una clasificación de los RPSH según el tipo de actividad realizada. Una clasificación según tipos de operaciones podría ayudar a una mejor gestión de los residuos.

Figura 2. *Clasificación de los RPSH, su clasificación se basa en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)*



Fuente: elaboración propia.

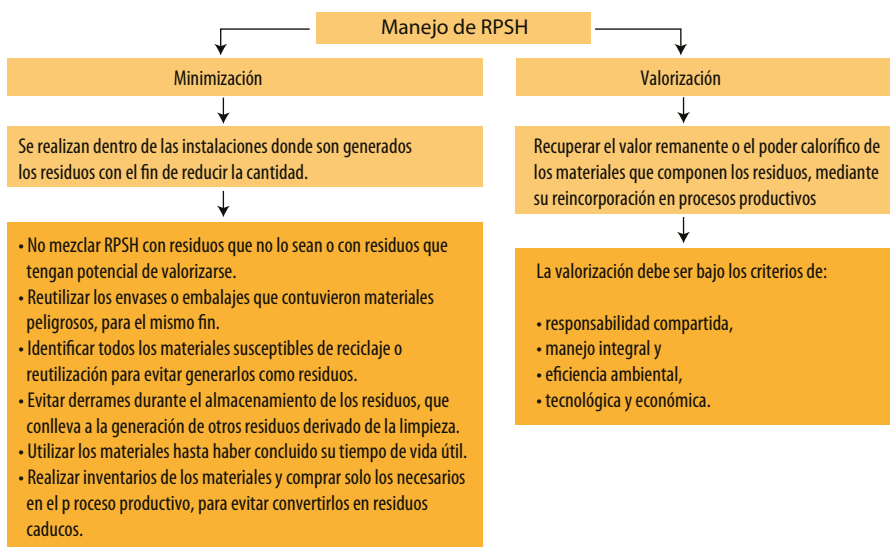
Para el caso de los tipos de generadores, a diferencia de los RP, para los RPSH su clasificación de generador es en función de los volúmenes generados y del tipo de figura que sea de acuerdo con la Ley de la ASEA en 2014 (figura 2).

Los planes de manejo de los RPSH de acuerdo con ASEA en 2020 son instrumentos que contienen un conjunto de acciones y procedimientos para facilitar el manejo integral de los residuos con el objetivo de minimizar la generación y maximizar la valorización de los RPSH.

La ASEA establece un manejo integral del RPSH muy similar al de los RP y con fundamento en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR): actividades de reducción en la fuente, separación, reutilización, reciclaje, coprocesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, cumpliendo objetivos de valorización, eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social.

En el manejo de RPSH, la ASEA hace énfasis en la minimización y valorización de estos (figura 3).

Figura 3. *Minimización y valorización de los RPSH*



Fuente: elaboración propia.

Una vez generados los RPSH, los que no hayan entrado de nuevo al ciclo de valorización o reutilización serán transportados a plantas de tratamiento, los RPSH mínimos a considerar generados de acuerdo con ASEA se muestran en la tabla 2:

Tabla 2. *RPSH generados en operaciones petroleras de acuerdo con la ASEA*

<i>RPSH generados de acuerdo con la ASEA</i>		
Recortes de perforación base aceite	Embalajes y envases que contuvieron materiales peligrosos	Residuos de pigmentos base plomo o cromo
Lodos de perforación	Pilas y baterías zinc-óxido	Gasolinas, diésel, naftas, provenientes de estaciones de servicio y talleres automotrices
Aceites gastados lubricantes	Baterías alcalinas	Líquidos de procesos (aguas contaminadas con hidrocarburos, líquidos con residuos de hidrocarburos)
Aceites gastados hidráulicos		
Aditamentos con mercurio, cadmio o plomo	Objetos punzocortantes	Lodos aceitosos
Solventes orgánicos gastados	Fármacos caducos	Material textil
	Residuos no anatómicos	Otros (no especificados)

Fuente: elaboración propia.

Los RPSH no vienen clasificados de acuerdo con el tipo de operación, una clasificación de estos según la operación realizada optimizaría el proceso de transporte e incluso de tratamiento. Adicionalmente se sugiere especificar el tipo de operación en que se generó, adjuntar las especificaciones de las sustancias utilizadas que componen el residuo. ASEA no hace mención del uso de materiales radioactivos, los cuales son muy comunes en operaciones de prospección de hidrocarburos y *fracking*. Los materiales radioactivos se utilizan como trazadores para poder verificar el crecimiento de la fractura en la zona de interés de los hidrocarburos o para comprobar por dónde están fluyendo los hidrocarburos en el yacimiento.

De acuerdo con el *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos* (DBGIR) publicado por SEMARNAT en 2020, el panorama de los RPSH se ha visto modificado por los siguientes acontecimientos:

- Publicación del *Anexo seguridad salud en el trabajo y protección ambiental* de Pemex en 2011.

- En 2013, se promulga la Reforma Energética permitiendo la participación de las compañías privadas (regulados de acuerdo con la Ley de la ASEA).
- La creación de la ASEA y su entrada en vigor en 2015, con el objetivo de supervisar la seguridad industrial, operativa y protección del medioambiente.

Adicionalmente, de acuerdo con este documento, la cadena de valor del SH está segmentada de la siguiente manera:

- *Upstream*: exploración, perforación y producción de pozo.
- *Midstream*: transporte y almacenamiento de hidrocarburos.
- *Downstream*: refinación, distribución y venta de petrolíferos.

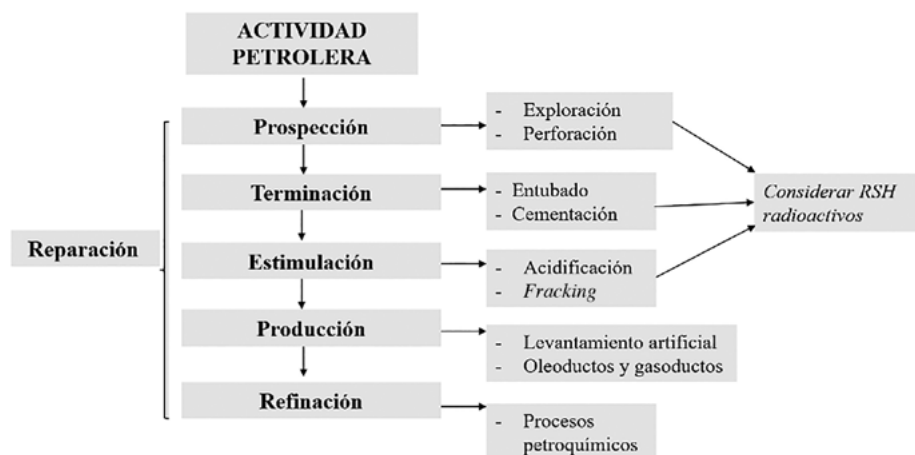
Y de esta segmentación el DBGIR menciona: La generación de residuos sólidos petroleros se analiza según las actividades características de la explotación y del aprovechamiento de los hidrocarburos.

Lo anterior cae en una contradicción con la clasificación de las actividades del SH de acuerdo con la LANSI:

- El reconocimiento y exploración superficial, y la exploración y extracción de hidrocarburos.
- El tratamiento, refinación, enajenación, comercialización, transporte y almacenamiento del petróleo.
- El procesamiento, compresión, licuefacción, descompresión y regasificación, así como el transporte, almacenamiento, distribución y expendio al público de gas natural.
- El transporte, almacenamiento, distribución y expendio al público de gas licuado de petróleo.
- El transporte, almacenamiento, distribución y expendio al público de petrolíferos.
- El transporte por ducto y el almacenamiento, que se encuentre vinculado a ductos de petroquímicos producto del procesamiento del gas natural y de la refinación del petróleo.

Por ello, que se propone una clasificación estandarizada de los RPSH de acuerdo con las actividades petroleras, desglosando a detalle los componentes de cada sustancia utilizada y su grado de peligrosidad. Elaborar una clasificación de acuerdo con el tipo de operación en el que se hayan generado los RPSH detallando los químicos y sustancias utilizadas y en las proporciones en que estos fueron mezclados, se sugiere a partir de la clasificación de Adams-Schroeder (1999) complementar la clasificación de los RPSH de acuerdo con el tipo de operación (figura 4):

Figura 4. Propuesta inicial de separación de RPSH de acuerdo con el tipo de operación



Fuente: elaboración propia.

Por lo anterior, para mejorar la gestión de los residuos del sector hidrocarburos en México se postula lo siguiente:

- Hay que considerar que de acuerdo con la propuesta de clasificación de RPSH, algunas de las operaciones se realizan de manera paralela sin embargo no generan los mismos residuos.
- Sin importar el tipo de generador RPSH, se sugiere contar con un seguro ambiental y plan de manejo de los RPSH apeguándose a las normas y autorizaciones de SEMARNAT mientras ASEA genera las autorizaciones correspondientes.

- La cédula de operación anual no es un documento adecuado ni conciso para los RPSH, es un fundamento para el manejo de este tipo de residuos, sin embargo, no cubre de manera clara el tratamiento dejando dudas y confusiones para el SH y sus residuos.
- Estandarizar los residuos dentro de los marcos legislativos vigentes que rigen: LGPGIR, Ley ASEA y SSPA, debido a que es confuso consultarlas buscando RPSH y las tres leyes se contradicen entre sí, propiciando dudas en cuanto al manejo y gestión de los RPSH. Las compañías y gobierno podrían aprovechar esto para una gestión no regulada y en caso de una contingencia respaldarse en esta misma situación.

La NOM-014-ASEA-2022, *Especificaciones de protección al medioambiente para la construcción y mantenimiento de pozos para la exploración y extracción de hidrocarburos en zonas agrícolas, ganaderas y eriales, fuera de áreas naturales protegidas o terrenos forestales*, especifica en el apartado:

Todos los residuos generados durante la Construcción y Mantenimiento de Pozos deben manejarse de conformidad con lo establecido en el marco regulatorio vigente en materia de manejo de Residuos. (SEMARNAT, 2022)

Así mismo, la NOM-006-ASEA-2017, *Especificaciones y criterios técnicos de seguridad industrial, seguridad operativa y protección al medioambiente para el diseño, construcción, pre-arranque, operación, mantenimiento, cierre y desmantelamiento de las instalaciones terrestres de almacenamiento de petrolíferos y petróleo*, en ninguno de sus apartados hace mención del manejo de manera específica de los RPSH, menciona solo estándares y medidas a considerar, sin embargo, estos estudios no se realizan en México al llevar a cabo una operación petrolera de cualquier tipo.

Los anterior es lo único mencionado respecto a los RPSH, otro claro ejemplo de que las normas y leyes de RPSH tienen un marco legislativo obsoleto, escueto y sin actualizaciones acorde a la realidad de las operaciones de *fracking*, poniendo en evidencia la falta de regulación correcta y actualizada, incluso un excelente apoyo para fortalecer las normativas y leyes

sería tomar como modelos (aplicados a México) las normativas de OHSAS<sup>1</sup> y de la EPA de los Estados Unidos de América.

La prohibición del *fracking* y otras técnicas de extracción como la estimulación matricial y la acidificación revertirían el crecimiento de la producción de petróleo y gas natural de los países que han introducido el *fracking* como un impulso económico y regresando a los países a ser importadores netos de petróleo y gas natural para el 2025. Por lo tanto, la economía experimentaría una recesión teniendo como consecuencia una reducción importante del producto interno bruto en las economías de los países que tiene como eje principal económico el petróleo (United States of America Department of Energy, 2021).

## Conclusiones

En México, la carencia de una legislación robusta y coherente sobre la gestión de los residuos peligrosos generados en el sector hidrocarburos da lugar a un vacío normativo que dificulta un manejo adecuado de estos desechos. Aunque existen algunas regulaciones generales en materia ambiental, no se cuenta con normativas específicas que aborden los residuos peligrosos provenientes de las diversas etapas de la industria petrolera, como la extracción, refinación y transporte de hidrocarburos. Esta ausencia normativa contribuye a una gestión inadecuada de los residuos, lo que incrementa los riesgos ambientales y de salud pública.

Además, la falta de una correcta separación en origen de los residuos peligrosos según el tipo de operación (por ejemplo, residuos de perforación, lodos contaminados, aceites usados o productos del *fracking*) agrava aún más la problemática. La mezcla inapropiada de residuos de diferentes orígenes, sin considerar sus características específicas, aumenta el riesgo de un tratamiento incorrecto o una disposición indebida de sustancias peligrosas, lo que puede derivar en la contaminación de suelos, cuerpos de agua y aire.

---

<sup>1</sup> OHSAS (Occupational Health and Safety Assessment Series) es un protocolo internacional que establece una serie de normas para la gestión de la seguridad y salud en el trabajo. Estas normas incluso abordan temas de RSPH y en materia de *fracking*.



La ausencia de un sistema de seguimiento y trazabilidad complica aún más el control y la remediación de las áreas afectadas.

La gestión deficiente de los residuos peligrosos en el sector hidrocarburos puede generar graves consecuencias ambientales, como la contaminación de aguas subterráneas y superficiales, la alteración de ecosistemas locales y la emisión de sustancias tóxicas al aire. Asimismo, los riesgos para la salud de las comunidades cercanas a las operaciones petroleras y de los trabajadores de la industria son elevados, ya que la exposición a compuestos como hidrocarburos aromáticos policíclicos, metales pesados y otros agentes carcinógenos puede provocar enfermedades graves. La infraestructura para el manejo de residuos peligrosos en México es insuficiente. La falta de plantas de tratamiento especializadas y de centros adecuados para la disposición final de los residuos generados por el sector hidrocarburos agrava la situación. Las instalaciones existentes no cuentan con la capacidad necesaria para tratar la cantidad de residuos generados, lo que conduce a su acumulación o disposición en sitios no autorizados.

Es esencial promover la concientización y capacitación de los trabajadores del sector y de las comunidades cercanas sobre los riesgos de los residuos peligrosos, así como las mejores prácticas para su manejo y disposición. Esto incluye la implementación de programas de formación continua para el personal involucrado en las operaciones y en la gestión de residuos, así como estrategias de sensibilización para la población sobre la importancia de una gestión ambientalmente responsable.

En resumen, la falta de una legislación adecuada y la escasa separación y manejo específico de los residuos peligrosos en el sector hidrocarburos de México generan riesgos ambientales y de salud significativos. La creación de un marco normativo claro, acompañado de una infraestructura adecuada y de estrategias de concientización y capacitación, son pasos fundamentales para mitigar estos riesgos y promover una industria más sostenible.

## Referencias

- Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente. (2020). *¿Qué es ASEA y qué regula?*. | Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente. <https://www.gob.mx/asea/articulos/que-es-asea-y-que-regula?idiom=es>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED]. (2005). *Informe de actividades. Subdirección de Asuntos Nacionales e internacionales*. Secretaría de Gobernación.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) de 2003. La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos, en el territorio nacional. 8 de octubre de 2003. DOF 08-05-2023.
- Schroeder, R. H. A., Rodríguez, V. I. D. y Hernández, L. G. (1999). Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano. *Terra Latinoamericana*, 17(2), 159-174.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (1996). *Norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas y bienes nacionales*. DOF: 03-06-1998.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos*. SEMARNAT.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2017). *Norma oficial mexicana NOM-006-ASEA-2017, Especificaciones y criterios técnicos de seguridad industrial, seguridad operativa y protección al medio ambiente para el diseño, construcción, pre-arranque, operación, mantenimiento, cierre y desmantelamiento de las instalaciones terrestres de almacenamiento de petrolíferos y petróleo, excepto para gas licuado de petróleo*. DOF: 27-07-2018.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2022). *Norma oficial mexicana NOM-014-ASEA-2022, Especificaciones de protección al medio ambiente para la construcción y mantenimiento de pozos para la exploración y extracción de hidrocarburos en zonas agrícolas, ganaderas y eriales, fuera de áreas naturales protegidas o terrenos forestales (cancela y sustituye a la NOM-115-SEMARNAT-2003, Que establece las especificaciones de protección ambiental que deben observarse en las actividades de perforación y mantenimiento de pozos petroleros terrestres para exploración y producción en zonas agrícolas, ganaderas y eriales, fuera de áreas naturales protegidas o terrenos forestales)*. DOF: 15-09-2022. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5664497&fecha=15/09/2022#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5664497&fecha=15/09/2022#gsc.tab=0)
- United States Department of Energy. (2021). *Economic and national security impacts under a hydraulic fracturing ban. Report to the president*. United States Department of Energy. <https://www.energy.gov/fecm/articles/economic-and-national-security-impacts-under-hydraulic-fracturing-ban>

## Sobre los autores

### **Bello Yañez, Xochitl Virginia**

Actualmente se encuentra en proceso de titulación como candidata a Doctora en Ciencias Ambientales y de la Sustentabilidad en el Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD-IPN). Maestra en Ciencias en Ingeniería Civil, con especialidad en Hidrología Subterránea, en la ESIA Zacatenco. Ingeniera Geóloga egresada de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura (ESIA), Unidad Ticomán, Ciencias de la Tierra, del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Su trayectoria académica ha estado orientada hacia la comprensión de procesos geológicos, hidrológicos y ambientales, con especial énfasis en la interacción entre los recursos minerales, los sistemas hídricos y la sostenibilidad socioambiental. A lo largo de su formación doctoral ha desarrollado investigación interdisciplinaria que articula el análisis geoquímico y ambiental de yacimientos minerales con enfoques de gobernanza ambiental, percepción social y políticas públicas para la transición energética. Ha participado en numerosos congresos internacionales, donde ha presentado ponencias y resultados de investigación relacionados con la geoquímica aplicada, la minería de litio y los impactos socioambientales derivados de la explotación de recursos naturales. Además, es autora de artículos científicos publicados en revistas indexadas en el Journal Citation Reports (JCR), lo que refleja la calidad, pertinencia y alcance de su producción académica. En 2024 realizó una Estancia de Verano en el Banco de México (Banxico), lo que le permitió integrar perspectivas económicas y de análisis estratégico a sus líneas de investigación, para vincular la gestión de recursos naturales críticos con la política pública y la economía nacional.

En conjunto, su trayectoria evidencia un firme compromiso con la investigación científica aplicada al desarrollo sustentable, con capacidad de generar apor-

taciones tanto en el ámbito académico como en el diseño de estrategias de gestión de recursos naturales, mitigación de impactos ambientales y construcción de políticas públicas basadas en evidencia.

Sus principales líneas de investigación son minerales críticos, litio, antropoceno, manejo sustentable de recursos minerales. Publicaciones mas recientes: *Mapping Scientific and Topic Evolution Around Lithium-Based Clean Energy Technologies: A Bibliometric Analysis* (2025) y *Green Roof Systems within the Framework of a Circular Economy: A Scoping Review* (2024).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0201-5946>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/search/publication?q=Bello%2BYa%25C3%25B1ez%2C%2BXochitl%2BVirginia>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?user=vzLHyMQAAAA-J&hl=es>

### **Pérez Galicia, Alejandra**

Doctora en Diseño y Estudios Urbanos por la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. Estancia posdoctoral 2019-2021 en el Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad de la Universidad Nacional Autónoma de México. Maestra en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad por el Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. Licenciada en Turismo por la Escuela Superior de Turismo del Instituto Politécnico Nacional. Generación 25 del programa de Formación de Líderes Ambientales del Colegio de México. Nivel 1 SNII. Actualmente es la jefa del Departamento de Sociedad y Política Ambiental y coordinadora de los programas de Maestría y Doctorado en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. Sus principales líneas de investigación son turismo sustentable, turismo urbano, planeación urbana participativa, pueblos y barrios originarios. Publicaciones mas recientes: *Imaginario turístico de un barrio originario. La Concepción, Coyoacán* (2021) y *El Pueblo de Xoco: de lo originario al mercado inmobiliario* (2021).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1574-0955>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Alejandra-Perez-Galicia>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=JOVWx-3cAAAAJ>

**Aguilar Martínez, Octavio**

Realizó sus estudios de Doctorado y Maestría en Ciencias Química en la Universidad Autónoma Metropolitana. En 2011 se recibió como Ingeniero Químico en la Universidad Autónoma Metropolitana. Actualmente es profesor de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPI-ICSA) del IPN. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores Nivel 1. A la fecha ha publicado 13 artículos científicos internacionales. Sus líneas de investigación están enfocadas en el desarrollo de fotocatalizadores con aplicación en la remediación de aguas contaminadas por compuestos tóxicos como son fenoles, clorofenoles, colorantes y fármacos.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4809-9674>

**Alcántara Cárdenas, Juan Alberto**

Doctor en Metalurgia y Materiales, con Maestría en Metalurgia y Materiales e Ingeniero en Metalurgia y Materiales por la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. En el Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo se desempeña como jefe del Departamento de Biociencias e Ingeniería, las principales líneas de investigación son nanomateriales con aplicación en medio ambiental, síntesis de compósitos de matriz metálica, síntesis de biocombustibles y geoquímica ambiental.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2056-2698>

Scopus: 14831065400

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=h7Le6x-YAAAAJ>

**Castañeda González, Raúl Eduardo**

Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad, Ingeniero Geofísico del Instituto Politécnico Nacional. Ha sido galardonado con importantes reconocimientos a nivel nacional por parte del IPN como la Excelencia Académica, dos veces selección México-IPN para competencias internacionales de la Society of Petroleum Engineers en Texas y Lusiana, EUA. Sus investigaciones se enfocan en el *fracking*, sus impactos ambientales y cómo reducirlos a partir de tecnologías innovadoras como la resonancia magnética nuclear. Ha trabajado en la industria petrolera en dos de las compañías más grandes del mundo: Baker-Hughes y Hal-

liburton, como ingeniero de yacimientos y *fracking* en México, Colombia, Ecuador y Estados Unidos. Además de analista de datos algunas de las aseguradoras y servicios de seguridad más grandes de Estados Unidos.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6122-5673>

### **Espinosa Bautista, Monserrat**

Maestra en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad por el Instituto Politécnico Nacional. Ingeniera Ambiental con especialidad en Gestión y Tecnologías del agua por el Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco. Con línea de investigación en el área de contaminación de aguas residuales por disruptores endocrinos y su degradación. Cuenta con experiencia profesional en el área de investigación e industria privada. Consultora ambiental con la gestión de trámites ante dependencias gubernamentales como ASEA, SEMARNAT, CRE, Conagua, entre otras, así como diligencias ante diversas áreas municipales. Actualmente estudia un Doctorado en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad en el CIIEMAD del IPN, en el área de diseño de catalizadores para la degradación de fármacos presentes en aguas. Colabora en proyectos de divulgación científica.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9672-0322>

### **Guevara Valdez, Jaime Alejandro**

Doctor en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad, Maestro en Administración de Empresas para la Sustentabilidad con especialidad en Desarrollo Sustentable e Ingeniero en Energía Eléctrica y en Sistemas Electrónicos. Sus principales líneas de investigación son la transición y eficiencia energética, electro-movilidad, las energías alternativas y renovables, la energía solar, la energía fotovoltaica, los estudios ambientales y socioecológicos, estudios sociotécnicos, el desarrollo sustentable y rural, la gestión y administración empresarial (con enfoque sustentable), la gestión y liderazgo (en instituciones privadas o educativas), y la educación ambiental.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9546-9308>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=IGmq0iUAAAAJ>

### **Gutiérrez Castillo, María Eugenia**

Doctora en Ciencias en la Especialidad de Toxicología, y Maestra en Ciencias en la Especialidad de Neurociencias por el CINVESTAV/IPN y Química Farmacéutica Indus-

trial por la ENCB/IPN. Cuenta con amplia experiencia en la aplicación de la química analítica, fue auxiliar de investigación en el CINVESTAV-IPN y asesora de la industria química, farmacéutica, PROFEPA y PGJ- Hidalgo y Universidades Tecnológicas. Se ha desempeñado como profesora de diferentes niveles educativos e instituciones de carácter público y privado, desde nivel medio superior hasta posgrado. Su actividad científica se ha centrado en la línea de investigación de ciencias ambientales apoyando colaboraciones de investigación tanto básica como aplicada. Ha participado en numerosas conferencias, congresos y proyectos de investigación relacionados con problemas de medioambiente. En los últimos años ha dirigido y participado en proyectos de investigación que abordan temáticas de contaminación y monitoreo ambiental, evaluación geoespacial de recursos naturales, toxicología ambiental, desarrollo de bioprocesos para aprovechamiento de residuos y terapia génica, cuyos trabajos han derivado en la formación de estudiantes de licenciatura (17), maestría (14) y doctorado (1), y en la publicación de artículos a nivel nacional e internacional. Actualmente se desarrolla como profesora-investigadora en el Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. Es parte del Departamento de Biociencias e Ingeniería y trabaja sobre la línea de investigación de ambiente, energía y salud dentro de las sublíneas de contaminación y monitoreo ambiental, biomasa como fuente de energía renovable, así como química y toxicología ambiental.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1316-0244>

### **López Hernández, Ruffo Cain**

Doctor en Ciencias en Desarrollo Regional y Tecnológico por el Instituto Tecnológico de Oaxaca (México). Obtuvo una Maestría en Ciencias en Desarrollo Regional y Tecnológico por la misma institución, y la Licenciatura en Arquitectura en la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca. Se ha desempeñado como profesor de diversas asignaturas en licenciatura y posgrado en la División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI) del Instituto Tecnológico de Oaxaca. Actualmente se desempeña como investigador posdoctoral por parte de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), donde realiza investigaciones sobre la vivienda, salud, habitabilidad y territorio en el Tecnológico Nacional de México, campus Oaxaca. Ha publicado artículos como “Vivienda saludable y estado de salud en las ciudades. El caso de Oaxaca, México”, revista *Región y sociedad*; y es coautor de “Manejo de la biodiversidad de cactáceas por

comunidad originaria de Oaxaca, México”, *Revista Estudios Ambientales - Environmental Studies Journal*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3125-9544>

Scopus: 58306487700

### **Martínez Rodríguez, María Concepción**

Doctora en Política Pública egresada de la Escuela de Graduados en Administración Pública y Política Pública del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, cuenta con la Maestría en Administración Pública y Políticas Públicas por la misma institución, y la carrera de Ingeniero Químico Industrial por el Instituto Politécnico Nacional. Profesora-investigadora del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), pertenece al Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1. Su experiencia profesional se ha desarrollado en el sector académico en el CIEMAD, en el sector gobierno trabajó en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) como subdirectora de Movimientos Transfronterizos y Asuntos Internacionales, y en el sector privado cuenta con una experiencia de más de 10 años en empresas transnacionales. Ha publicado libros, artículos científicos, capítulos de libro, participación en congresos nacionales e internacionales, dirigido proyectos de investigación, impartición de asignaturas a nivel posgrado (maestría y doctorado), dirección de tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Sus principales líneas de investigación son políticas públicas, gobernanza, gestión ambiental, cambio climático, desarrollo sustentable, soluciones basadas en la naturaleza, transdisciplina. Publicaciones mas recientes: *El papel de la tecnología para la gestión integral de residuos textiles en México: una revisión* (2025) y *La aplicación de la biotecnología en el diagnóstico de enfermedades de importancia en salud pública en México* (2025).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>

Scopus: 57384672800

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Maria-Martinez-Rodriguez-2>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?user=NB9c9WUAAAA-J&hl=es&authuser=2>

### **Mendoza Meza, Eréndira Yaretni**

Doctora en Ciencias Sociales por el Instituto de Ciencias Sociales y Humanidades de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). Licenciada en



Economía, Maestra en Gobierno y Desarrollo Regional, y Especialista en Docencia. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) nivel I. Premio ANUIES 2024 a la Innovación en la Práctica Docente. Ha sido promotora de la internacionalización educativa mediante metodologías como COIL y clases espejo. Columnista de la Revista Expansión y analista en medios nacionales. Ha colaborado en proyectos estratégicos para el desarrollo territorial en el estado de Hidalgo, como el Plan Estatal de Ordenamiento Territorial, el Plan de la Región de Jacala y el programa “Pachuca ciudad del conocimiento y la cultura”. Forma parte del cuerpo académico Planeación y Análisis Territorial de la UAEH. Su línea de investigación se enfoca en temas económicos, análisis poblacionales e internacionalización.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4012-9231>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Erendira-Mendoza-Meza>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=-clYLM-kAAAAJ>

### **Muñoz Díaz, Mariana Abigail**

Maestra en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad en el Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, su formación a nivel licenciatura fue como Ingeniera Ambiental en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotechnología, y una estancia de movilidad en la Universidad del Rey Juan Carlos en Madrid-España. Inició su ejercicio profesional en el área privada empresarial en la rama de consultoría ambiental con proyectos en materia de impacto ambiental, estudios de prefactibilidad ambiental, sistemas de gestión ambiental y de calidad, proyectos del sector de energía y estudios de generación con planes de manejo de residuos sólidos urbanos en instituciones académicas privadas. Al ingresar al campo de investigación mediante su formación en maestría se orientó por la línea de investigación en materia de valorización y aprovechamiento de residuos de manejo especial de tipo orgánicos, en específico con el proyecto de producción de biogás, así como su participación en otros proyectos de composta. En 2020 participó con el Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez en el proyecto vinculado del CONACYT denominado “Tripulación de vehículos recolectores de residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México: fuentes potenciales de contagio del SARS-CoV-2 entre la población”, el cual concluyó en febrero de 2021. Actualmente

trabaja su proyecto doctoral para el aprovechamiento del sargazo como residuo de manejo especial empleado como biosorbente.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6885-676X>

### **Ordaz Guillén, María Yolanda Leonor**

Doctorado y Maestría en Ciencias Quimicobiológicas. Egresada de la UNAM de la Licenciatura en Biología, ENCB IPN. Profesora titular C de tiempo completo del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Cuenta con una amplia experiencia laboral en el sector privado y gubernamental. Jefa de departamento, subdirectora y directora en SEDUE A SEMARNAP-INE de 1991 al 2000. Jefa de departamento y profesora-investigadora titular C de tiempo completo en IPN-CIEMAD de 2006 a la fecha. 3 artículos publicados en revistas JCR, 2 capítulos de libro, 6 estudiantes de licenciatura graduados y 9 de posgrado. Participante en redes de investigación como Red de Medio Ambiente (REMA) del Instituto Politécnico Nacional, Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Aplicada a Residuos Sólidos A. C. (SOMERS), Comité Consultivo Nacional para la Gestión Integral de Sustancias Químicas, Compuestos Orgánicos Persistentes y Residuos Peligrosos Sujetos a Convenios Internacionales en Materia Ambiental (CCNSQ) de la SEMARNAT de 2013 al 2019, y Coordinadora de la Red de Género del CIEMAD de agosto de 2019 a agosto 2023.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5060-3596>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=htmIP-VcAAAAJ>

### **Quezada Téllez, Luis Alberto**

Obtuvo la Maestría en Ciencias con especialidad en Dinámica No Lineal y Sistemas Complejos por la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM), y el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería por la Universidad Iberoamericana (UIA), Ciudad de México. Licenciado en Economía por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Cuenta con un diplomado en Regulación por la COFEMER y LATIN-REG. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) Nivel I (2023–2027) y perfil deseable PRODEP-SEP (2023–2026). Premio de investigación por la UIA en 2017.

Ha diversificado su labor científica en temas como sistemas dinámicos, modelación matemática, análisis fraccional, economía compleja y gestión de recursos

hídricos. Tiene más de 70 publicaciones en revistas nacionales e internacionales como *Fractals*, *Symmetry*, *Water*, *Axioms*, *Applied Economics* y *International Journal of Modern Physics C*. Ha dirigido cerca de 50 tesis en instituciones como la UAEH, UNAM, UAM y UIA.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9262-9951>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Luis-Alberto-Quezada-Tellez>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=-Zo8LK40AAAAJ>

### **Rangel Martínez, Yamile**

Doctora en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). También cuenta con un Doctorado *honoris causa* otorgado por el Instituto Kinneret de México (2022). Maestra en Arquitectura y Urbanismo por el ITESM. Arquitecta por el Instituto Tecnológico Regional. Reconocida con el premio al Liderazgo Educativo en América Latina 2024 por SAMEJ Publishing Books. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNII) nivel I (2025–2029) y perfil deseable PRODEP-SEP (2022–2025).

Ha desarrollado una patente registrada ante el IMPI: “Arreglo modular de mobiliario de oficina” (vigente hasta 2028). Desde 2006 se desempeña como docente de tiempo completo en la UAEH, integrándose al cuerpo académico consolidado “Planeación y Análisis Territorial”. Su línea de investigación se centra en el urbanismo sustentable y la resiliencia urbana.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8117-3218>

Scopus: 56919743900

### **Rodríguez Gutiérrez, Juanita**

Maestra en Ciencias en Manejo de Recursos Marinos por el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Obtuvo la Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Costeros en la Universidad Autónoma de Chiapas. Se ha desempeñado como jefa de departamento de Enlace Interinstitucional de Proyectos de Investigación en la Dirección de Investigación del IPN. En la actualidad es alumna del Doctorado en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad, en el Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Dentro de sus publicaciones se encuentran *Acetylcholinesterase Activity in Brain Tissue of Profundulus punctatus*

*and Poecilia butleri from a Watershed of Southern Mexico y Mercury and selenium concentrations in silky sharks (Carcharhinus falciformis) and their toxicological concerns in the southern Mexican Pacific.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1186-6523>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Juanita-Rodriguez-Gutierrez>

Google Académico: [https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=t\\_FgHwAAAAJ](https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=t_FgHwAAAAJ)

### **Rodríguez Tapia, Claudia**

Candidata a Doctora en Medio Ambiente por el CIIEMAD-IPN. Maestra en Ciencias e Ingeniera Química por la UNAM. Desde 2008 ha desarrollado una sólida trayectoria en investigación aplicada a la valorización de residuos orgánicos, energía renovable y evaluación ambiental. Actualmente es profesora en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, colaboradora del Laboratorio de Análisis y Monitoreo Ambiental del CIIEMAD-IPN. Ha participado en proyectos estratégicos sobre compostaje, digestión anaerobia y transformación de residuos en la Ciudad de México, así como en colaboraciones internacionales, entre ellas con el MIT. Su experiencia incluye estudios de biodegradabilidad de plásticos bajo normas internacionales y análisis de compostabilidad de residuos especiales para instituciones como BANXICO. Ha dirigido más de 40 trabajos terminales en Ingeniería ambiental y biotecnológica.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9061-6017>

Google Académico: [https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=\\_eK8C\\_QAAAAJ](https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=_eK8C_QAAAAJ)

### **Torres Mendoza, Arturo**

Maestro en Ingeniería Industrial por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), donde también cursó la Licenciatura en Ingeniería Industrial. Cuenta con estudios de Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo por la Universidad Autónoma de Baja California. Desde 1993 ha desarrollado una sólida trayectoria en la UAEH, ocupando diversos cargos académicos y administrativos, entre ellos: administrador de la Escuela de Trabajo Social, subjefe Administrativo del Área Académica de Ingeniería, coordinador de la Maestría en Ingeniería Industrial, y maestro fundador de la Escuela Superior de Apan. Ha contribuido al diseño y rediseño de programas académicos en la UAEH, como las licenciaturas en Tra-

bajo Social, Ingeniería en Tecnología del Frío e Ingeniería Económica y Financiera. También participó en la creación del Centro de Investigación Avanzada en Ingeniería Industrial (CIAII). Es coautor de un derecho de autor registrado ante INDAUTOR sobre el análisis espacial de residuos sólidos urbanos en Pachuca, Hidalgo. Ha colaborado en capítulos de libros y diversas publicaciones científicas, destacando investigaciones recientes sobre desarrollo económico, turismo, agroindustria y modelación de recursos hídricos en revistas como *Water*, *Sostener*, *Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP* y *Universita Ciencia*.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2511-2182>

### **Tovar Gálvez, Luis Raúl**

Doctor en Nutrición por la University of California, Berkeley, Maestro en Agricultura en Tohoku Daigaku, Sendai, Japón, e Ingeniero Químico de la Facultad de Química en la UNAM. Fue becario del Banco de México en la Universidad de Tohoku y becario del CONACYT en UC Berkeley. Actualmente se desarrolla como profesor-investigador en el CIEMAD-IPN, donde ha dirigido tesis, todas concluidas con 54 licenciaturas, 25 maestrías en ciencias y 8 doctorados en ciencias. Fue responsable de 2018 a 2020 de dos proyectos vinculados, uno sobre digestión anaerobia seca (CIBRUC, A.C.) y otro desarrollando un curso sobre valorización energética de residuos, abierto a la comunidad que la GIZ (The Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH) financió el monto de ambos proyectos, con la participación de estudiantes y personal académico del IPN. El CONACYT le apoyó con el proyecto “Tripulación de vehículos recolectores de residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México: fuentes potenciales de contagio del SARS-CoV-2 entre la población”, el cual concluyó en febrero de 2021. Es inventor de 4 patentes nacionales cuyo titular es el IPN, participa en el sub-comité de asuntos ambientales de NYCE en que se han construido los ANTEPROY-NMX-E-EE-296-NYCE-NORMEX-2021 y ANTEPROY-NMX-E-273-2022. Ha participado en proyectos vinculados con las industrias Zubex Industrial S. A. de C. V., SIGMA ALIMENTOS, S. A. de C. V., LATEX OCCIDENTAL EXPORTADORA S. A de C. V. y PLÁSTICOS URPRI, S. A. de C. V. para prueba de biodegradación de diferentes polímeros en apego a la norma ASTM-D-5511-02. Fue el responsable del proyecto vinculado para el Banco de México: “Pruebas de laboratorio para determinar la compostabilidad de 500 kg de residuo de billetes usado y 500 kg de residuos de billete nuevo” 2022-2023. En el 2023 tuvo una presentación en la Sociedad Japonesa de Ciclo de Materiales y

Gestión de Residuos en Osaka, Japón y es participante de la Red de Especialistas en Manejo de Residuos Sólidos y Rellenos Sanitarios SECIHTI.

Sus líneas de investigación son (a) gestión y manejo de residuos sólidos urbanos; (b) digestión aerobia y anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de otros materiales como el sargazo, lirio acuático, lodos de PTAR's y diferentes residuos agrícolas como la paja de trigo; (c) desarrollo de combustibles derivados de residuos; (d) biodegradación de diferentes materiales plásticos. Sus diversas publicaciones van enfocadas a temas de digestión anaerobia para producción de metano y su optimización; aprovechamiento de residuos y su valorización; sus contribuciones se encuentran en artículos de revistas como: *Energies*, *Environmental Science and Pollution Research*, *Fuel*, *Environmental Science Engineering*, *Biofuels*, *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *Biotechnol* y *Atmósfera*, entre otras.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0821-966X>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=4BlO-phMAAAAJ>

### **Yescas Martínez, Verónica Judith**

Doctora en Ciencias en Desarrollo Regional y Tecnológico por el Instituto Tecnológico de Oaxaca (México). Obtuvo una Maestría en Ciencias en Desarrollo Regional y Tecnológico por la misma institución, y la Licenciatura en Arquitectura en la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca. Se ha desempeñado como docente en la licenciatura y el área de posgrado de la Facultad de Arquitectura Diseño y Urbanismo (FADU), de la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca. Actualmente se desempeña como investigadora posdoctoral por parte de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), donde realiza investigaciones sobre el desarrollo regional, bienestar, asentamientos irregulares y urbanismo en la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca. Ha publicado artículos como: *Calidad de la vivienda en sectores informales urbanos y conurbados. El caso de zonas metropolitanas, Colombia y México*; y es autora del capítulo del libro *Construyendo modelos de bienestar subjetivo y objetivo para México urbano*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1456-1656>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=N8VP-2P0AAAAJ>

*De la ciencia a la acción para un futuro sostenible: abordando el cambio climático y la contaminación ambiental desde un enfoque interdisciplinario,*  
de Xochitl Virginia Bello Yañez y Alejandra Pérez Galicia  
(coordinadoras), publicado por Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., en versión digital para acceso abierto en los formatos PDF, EPUB y HTML.

**E**l planeta habla. Lo hace a través del silencio de los ríos que desaparecen, del verde que va diluyéndose y del gris que va en aumento, del suelo que se agrieta y de los mares con menos vida. En una era definida por la huella humana sobre el planeta, la ciencia y la sustentabilidad se entrelazan para ofrecer respuestas urgentes a la crisis ambiental del Antropoceno.

Este libro reúne una serie de investigaciones realizadas por científicos y académicos de instituciones de gran renombre que, desde distintas disciplinas y enfoques, revelan casos puntuales de la degradación ecológica y sus soluciones.

Desde la crisis hídrica en México y el colapso oculto de sus acuíferos hasta la transformación territorial provocada por el cambio climático en regiones rurales, cada capítulo es un llamado a repensar nuestra relación con el agua, la naturaleza y los residuos. Se abordan problemáticas actuales como la contaminación por disruptores endocrinos, la valorización de residuos sólidos y peligrosos, y soluciones innovadoras como el sargazo como fuente de energía limpia.

A través de un enfoque interdisciplinario, crítico y científico, esta obra traza un puente entre la ingeniería ambiental, las ciencias sociales y las políticas públicas. El libro ofrece una visión integral de los retos socioambientales actuales, impulsando el diálogo entre conocimiento científico y sociedad.



**Xochitl Virginia Bello Yañez** es Ingeniera Geóloga egresada del Instituto Politécnico Nacional (IPN) y candidata a Doctora en Ciencias Ambientales y de la Sustentabilidad por el CIIEMAD-IPN. Su labor académica se centra en la explotación sustentable de minerales críticos para la transición energética. Ha desarrollado investigación interdisciplinaria que integra geociencias, sustentabilidad y políticas públicas.



**Alejandra Pérez Galicia** es Investigadora nivel I del SNII. Sus principales líneas de investigación se centran en el turismo sustentable y urbano, la planeación urbana participativa y los pueblos y barrios originarios. Cuenta con una estancia posdoctoral (UNAM) y formación en Liderazgo Ambiental (Colmex).



**EDICIONES  
COMUNICACIÓN  
CIENTÍFICA**  
PUBLICACIONES  
ARBITRADAS

[comunicacion-cientifica.com](http://comunicacion-cientifica.com)



[DOI.ORG/10.52501/CC.364](https://doi.org/10.52501/CC.364)



**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



Instituto Politécnico Nacional  
"La Técnica al Servicio de la Patria"