



FACTORES CLAVE QUE INFLUYEN EN LA POLÍTICA INDUSTRIAL VERDE EN MÉXICO



EDICIONES
COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA

María Concepción Martínez Rodríguez
Dulce María Monroy Becerril
(coordinadoras)



Educación
Secretaría de Educación Pública



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

Factores clave que influyen en la política industrial verde en México



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



**EDICIONES
COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA**

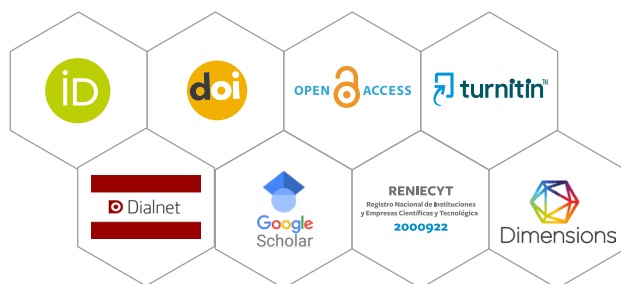
Ediciones Comunicación Científica se especializa en la publicación de conocimiento científico de calidad en español e inglés en soporte de libro impreso y digital en las áreas de humanidades, ciencias sociales y ciencias exactas. Guía su criterio de publicación cumpliendo con las prácticas internacionales: 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

[DOI.ORG/10.52501/cc.370](https://doi.org/10.52501/cc.370)




**COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA**
PUBLICACIONES
ARBITRADAS
HUMANIDADES, SOCIALES Y CIENCIAS

CC+I
**COLECCIÓN
CIENCIA e
INVESTIGACIÓN**

Factores clave que influyen en la política industrial verde en México

MARÍA CONCEPCIÓN MARTÍNEZ RODRÍGUEZ
DULCE MARÍA MONROY BECERRIL
(coordinadoras)



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



**EDICIONES
COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA**

Factores clave que influyen en la política industrial verde en México / María Concepción Martínez Rodríguez, Dulce María Monroy Becerril (coordinadoras). — Ciudad de México : Comunicación Científica, 2026. (Colección Ciencia e Investigación).

275 páginas : ilustraciones ; 23 × 16.5 centímetros

ISBN: 978-968-9738-32-9

DOI: 10.52501/cc.370

1. Política ambiental. 2. Desarrollo sostenible. 3. Desarrollo sustentable. I. Martínez Rodríguez, María Concepción, coordinadora. II. Monroy Becerril, Dulce María, coordinadora.

LC: GE170 F33

Dewey: 363.7 F33

La titularidad de los derechos patrimoniales y morales de esta obra pertenece a las coordinadoras, D.R.© María Concepción Martínez Rodríguez y Dulce María Monroy Becerril, 2026. 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, 2026

Diseño de portada: Francisco Zeledón • Interiores: Guillermo Huerta

Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., 2026,

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 978-968-9738-32-9

DOI 10.52501/cc.370

Este libro es derivado del proyecto de investigación SIP 20240927,
patrocinado por el Instituto Politécnico Nacional



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.370>

Índice

<i>Introducción</i>	11
1. Tendencias globales de la industria verde: Un análisis bibliométrico y lecciones para México, <i>María Concepción Martínez Rodríguez, Diego Domínguez Solís y Héctor Guadalupe Ramírez Escamilla</i>	21
Introducción.	22
Metodología	23
Resultados	24
Discusión	32
Conclusión.	36
Referencias.	37
2. Avances en el tratamiento sostenible del agua: Innovación tecnológica, competitividad económica e impacto ambiental <i>Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel, Dulce María Monroy Becerril y María Concepción Martínez Rodríguez</i>	39
Introducción.	40
Método.	42
Marco teórico	43
Metodologías y enfoques tecnológicos	49

Conclusión.	61
Referencias.	62
3. Transición sustentable en el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México, <i>Christian Muñoz Sánchez, Dulce María Monroy Becerril y María Concepción Martínez Rodríguez</i>	
Introducción.	65
Desarrollo	66
Metodología	67
Análisis y resultados	69
Conclusiones	71
Referencias.	81
4. Producción limpia en la política industrial verde: Entre la sostenibilidad y la transformación del modelo productivo, <i>Rodrigo Florêncio da Silva</i>	
Introducción.	85
Marco teórico y conceptual	86
Metodología	88
Resultados y discusión	97
Conclusiones y recomendaciones	100
Referencias.	105
5. Avances en tecnologías de aprendizaje automático e inteligencia artificial para procesos y desastres hidrológicos, <i>Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel, Christian Muñoz Sánchez y Dulce María Monroy Becerril</i>	
Introducción.	111
Método.	112
Marco teórico	114
Debates o controversias en curso	116
Revisión de los hallazgos	119
Principales hallazgos en el desempeño y precisión predictiva	121
Tendencias emergentes, innovaciones y debates.	124
	127

Análisis comparativo de estudios	129
Conclusión.	131
Referencias.	132
 6. La electromovilidad en México, una estrategia de transición energética hacia una industria de movilidad verde, <i>Ángel de Jesús Mc Namara Valdés y Andrea Alejandra Rendón Peña</i> . . .	137
Introducción.	138
Desarrollo	142
Grupos de trabajo para la adopción de la electromovilidad en México	148
Barreras para la adopción de la transición energética y la movilidad	151
Política pública de la transición energética.	152
Conclusión.	153
Referencias.	154
 7. Innovaciones en simulación y evaluación de impacto para la gestión integrada de los recursos hídricos, <i>Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel, Christian Muñoz Sánchez y Cristina Garibay Bagnis</i>	157
Introducción.	158
Términos y conceptos clave	160
Método.	161
Marco teórico	162
Principales hallazgos	168
Conclusión.	175
Referencias.	178
 8. La hoja de ruta hacia la descarbonización de la industria del cemento en México, <i>J. Aurelio Colmenero Robles, Miguel Alvarado Cardona y Obed Pardo Santos</i>	183
Introducción.	184
El proceso de fabricación del cemento Portland.	186
La producción del cemento en el mundo.	189

Los efectos adversos de la producción del cemento en la sociedad	191	
La historia de la fabricación del cemento en México	197	
Los 3 ejes de la industria mexicana del cemento hacia descarbonización en la producción (kg de CO ₂ / tonelada de cemento)	203	
Discusión	208	
Referencias.	210	
9. Tecnologías no térmicas en alimentos: Innovación para una industria verde y sostenible, <i>Ilse Monroy Rodríguez, José Irving Valdez Miranda, Andrea Patricia Cuevas Gómez y Raúl Eduardo López Hernández</i>		215
Introducción a las tecnologías no térmicas.	216	
Principales tecnologías no térmicas aplicadas en alimentos . . .	217	
Ventajas en el impacto ambiental y propiedades nutricionales de alimentos producidos por tecnologías verdes	227	
Perspectivas de las tecnologías no térmicas y su impacto en la sostenibilidad alimentaria en México	230	
Conclusión.	232	
Referencias.	232	
10. El uso de suelo sustentable y la agricultura sustentable de México: Desafíos ambientales y sociales, <i>Miguel Alvarado Cardona, J. Aurelio Colmenero Robles y Obed Pardo Santos</i> . . .		241
Introducción.	242	
Desarrollo de la metodología	244	
Fase de caracterización	245	
Fase de análisis	247	
Resultados	259	
Conclusiones	261	
Referencias.	261	
<i>Sobre los autores</i>	265	

Introducción



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.00.01>

En la presente obra proponemos la integración de algunos factores clave que influyen en la política industrial verde en México, con la intención de identificar el pasado, presente y futuro para México en la materia, porque consideramos que debemos estar preparados para enfrentar esta nueva ola de lineamientos económicos que supuestamente contemplan lo ambiental en la cadenas de producción, de suministro, y que es un juego al cual México no puede llegar tarde, sin embargo, esta preparación no puede estar basada en falsas acciones, queremos que nuestro país se integre preparado con todos los elementos que conlleva la producción verde, mediante políticas bien diseñadas y pensadas verdaderamente a largo plazo, unas políticas industriales sustentables, con todo lo que implica la palabra sustentable y nos sólo verde como se ha estado manejando en el mundo en general.

Para ello pensamos en temas vanguardistas para que el lector conociera con amplitud lo que implicarían estos factores clave; es así como a lo largo de diez capítulos pretendemos dar a conocer las oportunidades que México tiene para integrarse a esta nueva economía que está integrando lo verde como un requisito para seguir participando en la producción de bienes y servicios.

El primer capítulo lo pensamos para dar un panorama general en la materia y lo hemos denominado: Tendencias globales de la industria verde: un análisis bibliométrico y lecciones para México, con el objetivo de comprender cómo distintos países diseñan políticas y estrategias de transición

hacia modelos productivos bajos en carbono. Este trabajo examina la evolución de la literatura científica sobre industria verde, sostenibilidad y políticas públicas, identificando tendencias, enfoques conceptuales, distribución geográfica y lecciones aplicables al contexto mexicano. Se destaca que la industria verde constituye un espacio en consolidación y con alto potencial para guiar la transición hacia un desarrollo sostenible.

Analizando bajo el contexto de sustentabilidad, hemos abordado el tema del agua. Sin agua nada existe y es un elemento estratégico que en estos momentos, en varias latitudes, muestra severos problemas, por su extracción, suministro, escasez, por su gestión en general, y pensando que sin agua no hay producción es necesario, incorporar temas de vanguardia, como el que tocamos en nuestro capítulo dos: Avances en el tratamiento sostenible del agua: innovación tecnológica, competitividad económica e impacto ambiental, en el cual analizamos los avances en el tratamiento sostenible del agua considerando la innovación tecnológica, la competitividad económica y el impacto ambiental, debido a la creciente importancia del tratamiento eficiente del agua y a la escasez de recursos hídricos, el rápido crecimiento de la población mundial y los crecientes problemas ambientales.

Los hallazgos indican, a través del análisis temático, que la filtración por membrana, los procesos de oxidación avanzada y los tratamientos basados en nanotecnología tienen altas eficiencias de eliminación, pero enfrentan desafíos por el costo, la energía y problemas de ensuciamiento. Incorporar estrategias de recuperación de recursos en los modelos de negocios crea oportunidades para mejorar la viabilidad económica, al reducir los costos operativos.

Los estudios destacan la importancia de las métricas de sostenibilidad, como la huella de carbono o las evaluaciones del ciclo de vida en la orientación de decisiones sobre adopción de tecnología. Nuevas tendencias están surgiendo aplicaciones de inteligencia artificial (IA) para la optimización en tiempo real, sistemas descentralizados y pilotos que demuestran la viabilidad en el mundo real, pero las métricas inconsistentes, los datos limitados a largo plazo y las políticas siguen siendo lagunas urgentes.

El análisis finaliza con un llamamiento a la investigación interdisciplinaria, a desarrollar metodologías adaptadas a las necesidades y regulaciones

propicias para promover estos estudios disruptivos y lograr una seguridad hídrica equitativa.

Otro sector que hace competitivo a nuestro país es el aeronáutico, cuya contribución con respecto a la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) es desestimada por algunos gobiernos. En algunos países se opta por campañas que eviten el uso del transporte aéreo como una medida para disminuir los GEI, sin embargo esto no se puede generalizar debido a las pocas alternativas que se tienen en México como su incipiente desarrollo del transporte ferroviario; es por ello que se analiza en el tercer capítulo la: Transición Sustentable en el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México.

Recordemos que el transporte aéreo se enfrenta actualmente a la búsqueda de convertirse en un transporte sustentable a largo plazo, ya que todavía mantiene una fuerte dependencia de combustibles fósiles con grandes emisiones contaminantes del medio ambiente. La situación actual presenta desafíos y cambios complejos con relación a la sustentabilidad.

Estos cambios en beneficio del medio ambiente son llamados transiciones sustentables (TS). La idea central es que las TS implican cambios a largo plazo hacia modos de producción y consumo más sustentables en múltiples dimensiones (social, ambiental y económica), por lo tanto, el propósito del presente capítulo es analizar la transición sustentable en el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México. A través del desarrollo de la metodología de estudio de caso y análisis funcional se revelaron debilidades dentro de las funciones evaluadas para la adecuada transición sustentable.

Repasando lo que debemos de cubrir para tener una lista de estos factores clave que lleven a México a una política verde, se propuso el capítulo cuatro sobre: Producción limpia en la política industrial verde: entre la sostenibilidad y la transformación del modelo productivo.

La emergencia climática, la presión sobre los recursos naturales y las exigencias de competitividad en mercados globales están forzando una revisión de los modelos productivos tradicionales. En este contexto, conceptos como “industria verde” y “sustentabilidad” suelen utilizarse como sinónimos, aunque presentan diferencias fundamentales.

Mientras la industria verde se orienta a la reconversión tecnológica, la innovación y la reducción del impacto ambiental en los procesos, la sostenibilidad implica una transformación estructural más amplia, que integra dimensiones sociales, culturales, económicas y ecológicas.

Este capítulo analiza la tensión y la complementariedad entre ambos conceptos, proponiendo la producción limpia como puente práctico y estratégico. Desde esta perspectiva, se plantea que la producción limpia puede ser una herramienta concreta para el diseño e implementación de políticas industriales verdes, superando barreras estructurales y promoviendo prácticas sostenibles. Se examina el rol de la producción limpia en la construcción de una política industrial verde en México, evaluando su capacidad para alinear intereses económicos con la agenda de sostenibilidad. Como resultados, se identifican patrones comunes, limitaciones para su escalamiento y propuestas de política pública que posicionen la producción limpia como pilar de una industria verde, inclusiva y resiliente.

En el desarrollo de los temas, nos dimos cuenta que a las nuevas tecnologías que están apareciendo, que nos están invadiendo, podemos utilizarlas para ayudar a paliar algunos problemas con los que nos enfrentamos; el quinto capítulo se enfoca a los: Avances en tecnologías de aprendizaje automático e inteligencia artificial para procesos y desastres hidrológicos, el avance del aprendizaje automático y la Inteligencia Artificial se han convertido en avances tecnológicos pioneros que han transformado el campo de la hidrología, con sus ofertas sin precedentes de herramientas nuevas que se pueden utilizar para modelar procesos hidrológicos complejos y administrar catástrofes hidrológicas.

En esta revisión de la literatura se resumen los avances pertinentes en aplicaciones relativas a pronóstico de inundaciones, predicción de sequías e hidrología, para informar sobre la precisión de predicción, la escala de las aplicaciones y la capacidad en tiempo real del monitoreo de los desarrollos más recientes.

Las técnicas emergentes como las arquitecturas de aprendizaje profundo, incluido las redes neuronales recurrentes con unidades (LSTM), las redes neuronales convolucionales (CNN) y otras, modelos de conjunto y marcos híbridos, muestran una mejora significativa en comparación con los modelos hidrológicos tradicionales, al conseguir dinámicas no lineales y tiempos

significativamente mejorados para la prevención de las intervenciones y medidas de desastre. Además de la integración mejorada de sensores de internet de las cosas (IoT), datos de teledetección y marcos de *big data* para la implementación de monitoreo en tiempo real y sistemas de alerta temprana. La revisión señala brechas críticas, que incluyen la falta de evaluación a largo plazo y la contextualización y falta de escala de implementación de IA. El capítulo concluye con recomendaciones para futuras investigaciones, que incluyen la exploración de enfoques híbridos, la promoción de plataformas de colaboración intersectorial y la integración de herramientas de IA en marcos políticos y de gobernanza.

Otro de los temas que elegimos para la obra fue el de movilidad y las diferentes propuestas en el mundo, como un panorama general, y en nuestro país cómo se está enfrentando esta propuesta internacional, siendo que nuestro país es petrolero, qué opciones se están aplicando y cómo está llevando a cabo esta transición; el capítulo seis toca: La electromovilidad en México, una estrategia de transición energética hacia una industria de movilidad verde, México enfrenta el desafío global de la transición energética, la adopción de energías alternativas se vuelve ahora una de las tareas prioritarias, no solamente para satisfacer la demanda energética, sino también para el sector movilidad y transporte que pueda funcionar con vehículos eléctricos y se construya una industria de movilidad más sustentable.

La electromovilidad emerge como una estrategia central en este proceso, ofreciendo la oportunidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles, disminuir las emisiones contaminantes en los centros urbanos y fomentar el desarrollo de una industria verde nacional. El objetivo de este capítulo es explorar el panorama actual de la electromovilidad en México por medio del análisis del potencial para impulsar la transición en términos de marco legal, infraestructura y preferencia por utilizar vehículos eléctricos.

La metodología utilizada para este trabajo fue de tipo mixta, examinando aspectos cuantitativos en términos de puntos de carga, vehículos eléctricos en circulación en México y el consumo energético nacional, también aspectos cualitativos como la percepción de la movilidad eléctrica y las tendencias de movilidad de las personas y las mercancías. Los resultados muestran que la adopción de vehículos eléctricos en México va en aumen-

to y que el desarrollo de la infraestructura de carga tiene diversas áreas de oportunidad lo que ocasiona una percepción social dividida sobre la electromovilidad como estrategia de industria verde para la movilidad.

El avance hacia una política industrial verde nos lleva al uso de diferentes opciones, para lograrlo pensamos en las: Innovaciones en simulación y evaluación de impacto para la gestión integrada de los recursos hídricos, que establecemos en el capítulo siete; teniendo el acceso al agua dulce como un desafío, la gestión integrada de los recursos hídricos es vital para abordar la sequía, el cambio climático y la degradación ambiental.

Durante el periodo de 2021 a 2025, los estudios prominentes se definen, entre ellos las innovaciones con relación a las herramientas de simulación y evaluación del impacto de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH). La simulación presenta modelos de escenarios cambiantes, opuestos a la evaluación del impacto que mide recompensas y fomenta la sostenibilidad de las políticas; sin embargo, las brechas regionales persisten en términos socioculturales, de integración y de datos, además de ser mínimas, especialmente en regiones en vías de desarrollo.

Aspectos emergentes identificados son el riesgo climático modelado, *big data* y métricas de sostenibilidad codificadas. La discusión ocurrió entre lo que es ser complejo o accesible, expertos en o frente a expertos, en términos de enfoque coactual, de prioridades políticas frente a prioridades científicas. Este capítulo demuestra la importancia de herramientas emergentes y la investigación interdisciplinaria y el seguimiento a largo plazo para la equidad y la GIRH resiliente del flujo de agua. La investigación a futuro debe abordar las deficiencias metodológicas, asegurando diversidad y el establecimiento de cuadros adaptados al entorno global donde se encuentren.

Otro sector que incluimos en la obra por su aporte al Producto Interno Bruto, que se toma como un indicador constante de la vida económica de un país es el sector de la construcción; para ello el capítulo ocho nos ofrece: La hoja de ruta hacia la descarbonización de la industria del cemento en México.

El cemento es un producto primordial para el desarrollo de muchos países debido a que es utilizado en la mayoría de las construcciones civiles como aeropuertos, puentes, carreteras, fábricas, viviendas, entre otras obras. Los impactos ambientales generados por la operación de plantas product-

ras de cemento han propiciado el surgimiento de movimientos sociales alrededor del mundo, que reivindican la lucha por el derecho a un medio ambiente sano, la defensa del territorio, sus recursos y las formas de vida tradicionales de la población. Ente las prioridades de la industria del cemento está llevar a cabo estrategias sostenibles e innovadoras más eficientes para reducir emisiones de NO_x , SO_x , CO_2 , polvos de SiO_2 y otros elementos tóxicos, a fin de mejorar la competitividad de esta actividad industrial. Esta nueva visión deberá contemplar: 1) mejorar la eficiencia energética; 2) cambiar a combustibles alternativos (combustibles carbono neto cero); 3) reducir la relación de clínker a cemento e integrar la captura de carbono en la producción de cemento como el eje principal de mitigación de carbono en este sector industrial y 4) priorizar las alternativas de producción del cemento, a fin de no afectar el medio ambiente y la salud humana.

La soberanía alimentaria es una parte importante de un país, y la política de ciencia y tecnología del nuestro lo propone como un tema a trabajar, es por ello que el pensar en la industria de los alimentos como una industria que debe transitar a una producción sustentable, se incluye la innovación como algo impostergable, el capítulo nueve escribe sobre: Tecnologías no térmicas en alimentos: innovación para una industria verde y sostenible. El uso de tecnologías no térmicas en la industria alimentaria es una estrategia clave para avanzar hacia un sistema sostenible y eficiente. En un contexto en el cual la demanda de alimentos seguros y nutritivos crece junto con la necesidad de reducir el impacto ambiental, estas tecnologías ofrecen soluciones innovadoras. Su aplicación permite reducir el consumo energético y la generación de residuos, conservando la calidad sensorial y nutricional de los alimentos al evitar la aplicación de altas temperaturas que pueden degradar compuestos bioactivos.

En la ciencia y tecnología de alimentos, el ultrasonido, las altas presiones hidrostáticas y campos electrostáticos de alto voltaje han demostrado ser herramientas eficaces para asegurar la calidad microbiológica, prolongar la vida útil y conservar/mejorar propiedades funcionales. Su integración en la industria no sólo responde a exigencias regulatorias y comerciales, sino que también impulsa la competitividad del sector al alinearse con principios de sustentabilidad e innovación. En este capítulo se explorarán las ventajas ambientales, nutricionales y económicas de estas tecnologías, así como su

papel en la transición hacia una producción alimentaria más responsable en México.

La soberanía alimentaria también se considera como un elemento clave la conservación de los recursos naturales; en este caso incluimos al suelo, ya que si no hay suelo no hay alimentos, por ello cerramos nuestra obra con el capítulo 10 que aborda el tema: El uso sustentable del suelo y la agricultura sustentable de México. Los desafíos ambientales y sociales.

La sustentabilidad es un principio con estrecha relación entre la economía, la sociedad, el medio ambiente y la conservación de la biodiversidad. La agricultura sustentable, bajo este principio, se centra en satisfacer las necesidades alimentarias actuales sin comprometer la de las futuras generaciones.

Las técnicas de sustentabilidad agrícola desarrollan programas de conservación y protección del suelo, con el agravante de que su implementación es atomizada, origina problemáticas del suelo que se manifiestan en tipos de degradación física (erosión), química (sales y compuestos tóxicos) y biológica (pérdida de flora y fauna). Lo anterior supone que estos tipos de degradación limitan el desarrollo de una agricultura sustentable.

Con el fin de mostrar que en México la agricultura sustentable no se ha desarrollado plenamente en la actualidad, se llevó a cabo una recopilación de información, caracterización y una etapa de análisis. Por lo tanto, la superficie agrícola en México es 32.1 millones de hectáreas, el 26.8% es de riego y el 73.2% es de temporal; un aspecto adicional consiste en que el 85% de los suelos presenta degradación física y el 95%, degradación química: la superficie dedicada a la agricultura orgánica es de 169 000 ha y 47 795 ha suelen considerarse sustentables. Si los suelos se encuentran en fase de degradación física y química, la agricultura sustentable no existe, por lo tanto, necesitamos crear una serie de políticas que nos ayuden a la conservación de este vital recurso, estableciendo planes de acción con base en las características de deterioro del suelo, es inminente que trabajemos para lograrlo.

Es así como hemos diseñado esta obra para abonar al conocimiento de los factores clave que influyen en la política industrial verde en México y con ello estar preparados para seguir participando de una economía global, preparándose localmente para no ser excluidos de estos nuevos lineamien-

tos que escudándose en la sustentabilidad están diseñando una serie de políticas para la producción de bienes y servicios.

MARÍA CONCEPCIÓN MARTÍNEZ RODRÍGUEZ

DULCE MARÍA MONROY BECERRIL

1. Tendencias globales de la industria verde: Un análisis bibliométrico y lecciones para México*



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.01>

MARÍA CONCEPCIÓN MARTÍNEZ RODRÍGUEZ**

DIEGO DOMÍNGUEZ SOLÍS***

HÉCTOR GUADALUPE RAMÍREZ ESCAMILLA****

Resumen

La industria verde se ha consolidado en las dos últimas décadas como un eje estratégico para conciliar crecimiento económico y sostenibilidad ambiental, por lo que su estudio resulta esencial para comprender cómo distintos países diseñan políticas y estrategias de transición hacia modelos productivos bajos en carbono. El objetivo de este trabajo fue examinar la evolución de la literatura científica sobre industria verde, sostenibilidad y políticas públicas, identificando tendencias, enfoques conceptuales, distribución geográfica y lecciones aplicables al contexto mexicano.

La metodología consistió en una revisión bibliométrica en las bases de datos Scopus y Web of Science sin restricción de periodo inicial, recuperando un total de 48 documentos publicados entre 2006 y 2025 en idioma inglés. El análisis se desarrolló mediante Bibliometrix en R y VOSviewer, lo que permitió generar mapas de coocurrencia, densidad y redes de colabo-

* Capítulo derivado del proyecto de investigación SIP 20251143.

** Doctora en Políticas Públicas. Profesora-investigadora del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411> ; correo electrónico: mcmartinezr@ipn.mx

*** Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8402-5157>

**** Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9440-4644>

ración entre autores e instituciones. Los resultados mostraron que la producción científica registró un crecimiento sostenido a partir de 2015, con un auge entre 2020 y 2024. Los clústeres de palabras clave revelaron tres ejes dominantes: políticas públicas e institucionales, innovación y financiamiento verde, y sostenibilidad ambiental-energética. China, Estados Unidos y la Unión Europea lideraron la producción, mientras que América Latina y África tuvieron una representación limitada. En conclusión, se destaca que la industria verde constituye un espacio en consolidación y con alto potencial para guiar la transición hacia un desarrollo sostenible.

Palabras clave: *industria verde, política industrial, economía circular, innovación sostenible, desarrollo sostenible.*

Introducción

En la última década, el concepto de industria verde ha ganado relevancia como parte de la respuesta global al cambio climático y al desarrollo sostenible. Se entiende como un modelo industrial que integra consideraciones ambientales y sociales en sus procesos productivos, buscando reducir emisiones y minimizar impactos negativos sobre los ecosistemas y la salud humana (Nyangchak, 2022). En este sentido, se promueven prácticas empresariales más limpias, eficientes en el uso de recursos y bajas en carbono, así como el crecimiento de sectores orientados a bienes y servicios ambientales, entre ellos energías renovables, gestión de residuos y tecnologías limpias (Altenburg y Assmann, 2017). Organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente han destacado que la transformación verde de la industria es una vía estratégica para alcanzar un desarrollo inclusivo y sostenible en el largo plazo (Altenburg y Assmann, 2017).

A nivel internacional, se observa un impulso notable hacia la industria verde a través de estrategias y políticas públicas. Economías avanzadas como la Unión Europea y Estados Unidos han lanzado paquetes de inversión y legislación sin precedentes, entre ellos el Pacto Verde Europeo y la Ley de

Reducción de la Inflación, con el objetivo de descarbonizar la producción industrial hacia 2050 (Dos Santos, 2023). Estas iniciativas, junto con instrumentos como impuestos al carbono, están catalizando una transformación industrial orientada a la producción de insumos sostenibles, como el acero verde y el cemento de bajas emisiones (Dos Santos, 2023). En América Latina, el interés por esta agenda también ha crecido. La UNCTAD (2025) ha subrayado la importancia de profundizar en políticas industriales verdes que permitan aprovechar las ventajas comparativas de la región, como la riqueza en litio y energías renovables, para impulsar una transición resiliente.

En el caso de México, la pertinencia del debate es clara. El país enfrenta el reto de compatibilizar el crecimiento económico con sus compromisos ambientales, en un contexto de fuerte dependencia de los combustibles fósiles y de rezagos en la adopción de una estrategia nacional de recuperación verde (Climate Transparency, 2020). A pesar de contar con un potencial significativo en energías limpias y de beneficiarse de procesos de relocalización de industrias, las políticas actuales muestran una falta de alineación con los objetivos climáticos internacionales (Economics Observatory, 2025). Así, realizar un análisis bibliométrico sobre qué es la industria verde, cómo se desarrolla en el mundo y qué lecciones deja para México resulta esencial para delinear un marco conceptual robusto, identificar tendencias globales y extraer aprendizajes estratégicos que fortalezcan la competitividad y sostenibilidad del sector productivo nacional.

Metodología

El presente trabajo es una revisión bibliográfica sobre el desarrollo de la industria verde y sus implicaciones en la sostenibilidad y las políticas públicas a nivel global. Para la selección de los trabajos de investigación se realizó la búsqueda de las palabras clave “green industry”, “sustainability” y “policies” en las bases de datos Scopus y Web of Science, sin establecer un periodo específico, con el fin de evaluar la evolución de la literatura en el tiempo. La búsqueda se limitó al idioma inglés para asegurar la comparabilidad de los resultados.

Se llevaron a cabo dos análisis principales: bibliométrico y temático. En el primero, a partir del uso del *software* VOSviewer versión 1.6.17 (Van Eck y Waltman, 2021), se obtuvieron mapas de coocurrencia y de densidad de acuerdo con las principales palabras clave y su fuerza de correlación. Para este análisis, se eliminaron términos repetidos en singular y plural o con variaciones léxicas. De manera complementaria, mediante el paquete Bibliometrix de R (Aria y Cuccurullo, 2017), se generaron representaciones gráficas de la producción científica sobre industria verde y su relación con la sostenibilidad y las políticas a lo largo del tiempo, incluyendo tendencias de publicación, autores, países y redes de colaboración.

En el segundo análisis, de carácter temático, se recuperó información relevante de los artículos seleccionados para identificar las principales líneas de investigación, políticas implementadas y enfoques de sostenibilidad vinculados con la industria verde. Los resultados se discuten con el objetivo de resaltar las lecciones aprendidas en diferentes contextos internacionales y aquellas que pueden aportar orientaciones estratégicas para el caso de México.

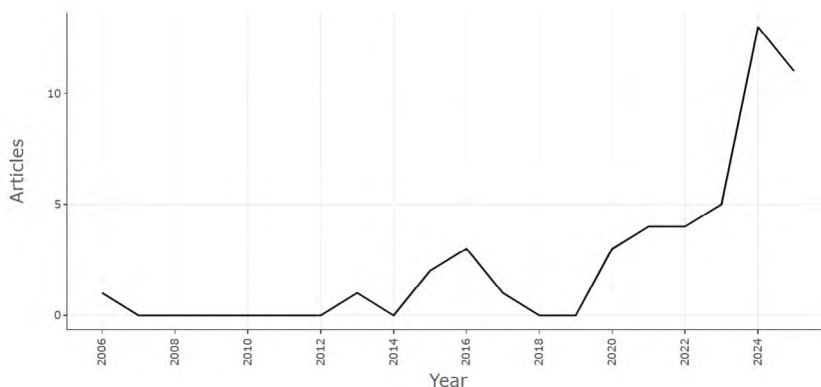
Resultados

El análisis bibliométrico realizado sobre la literatura vinculada a industria verde, sostenibilidad y políticas permitió identificar un conjunto de publicaciones que evidencian el creciente interés académico en este campo.

En la figura 1.1 podemos observar que la producción académica sobre industria verde, sostenibilidad y políticas muestra una tendencia baja entre 2005 y 2015, con escasos artículos publicados. A partir de 2016 se observa un incremento paulatino, aunque aún con cierta inestabilidad, lo que refleja un campo en consolidación. El crecimiento sostenido comienza alrededor de 2020, coincidiendo con la expansión de las agendas de recuperación verde tras la pandemia de covid-19 y el fortalecimiento de compromisos internacionales como el Pacto Verde Europeo y los planes de descarbonización industrial. Entre 2023 y 2024 se registra el mayor número de publicaciones, alcanzando más de diez artículos anuales, lo que confirma el po-

sicionamiento de la industria verde como un tema emergente de alta relevancia científica y política.

Figura 1.1. Productividad científica por año

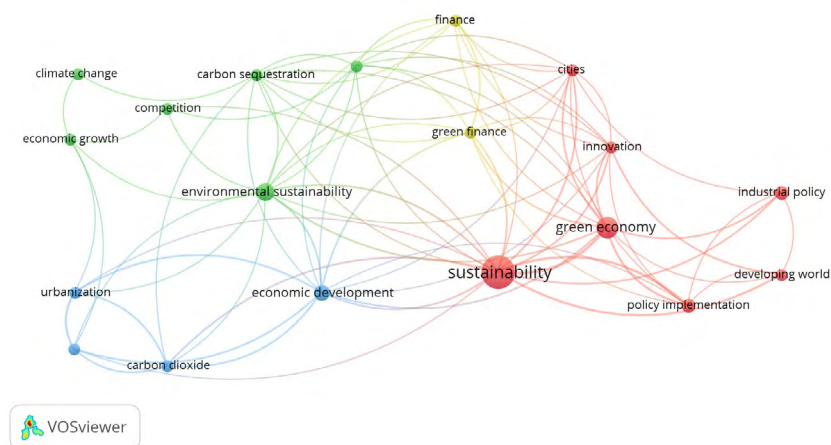


Fuente: elaboración propia.

En la figura 1.2, la red de coocurrencia de palabras clave evidencia la centralidad del término *sustainability*, que actúa como nodo articulador de diferentes líneas de investigación. En torno a este concepto se identifican al menos tres clústeres principales:

1. *Clúster rojo (político-institucional)*: incluye términos como *green economy*, *policy implementation*, *industrial policy* e *innovation*. Representa la dimensión de diseño e implementación de políticas públicas.
2. *Clúster verde (ambiental)*: vinculado con *environmental sustainability*, *climate change* y *carbon sequestration*. Este grupo concentra investigaciones sobre mitigación de emisiones, gestión de recursos naturales y resiliencia ambiental.
3. *Clúster azul (económico-productivo)*: centrado en *economic development*, *carbon dioxide*, *energy consumption* y *urbanization*. Aquí se agrupan los estudios que analizan la relación entre desarrollo económico, consumo energético y emisiones, con implicaciones directas para los países en vías de desarrollo.

Figura 1.2. Red de coocurrencia

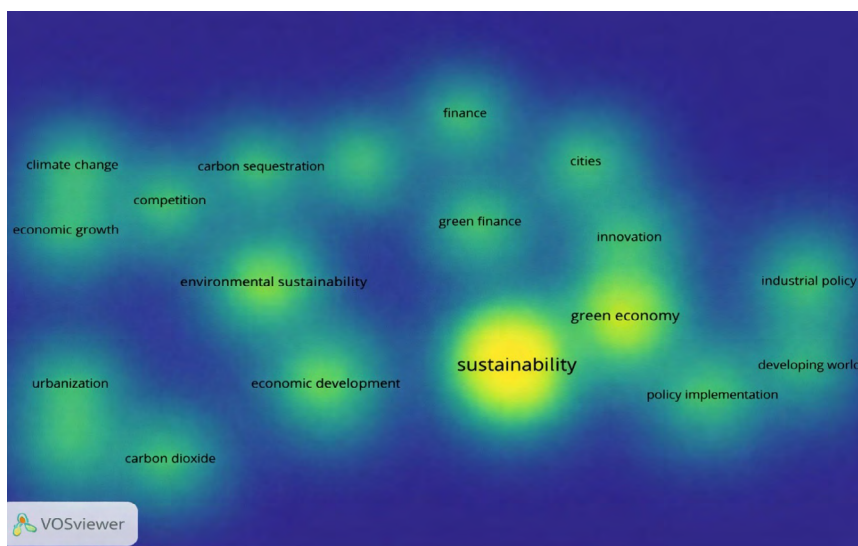


Fuente: elaboración propia.

De manera complementaria, se observa un clúster amarillo más pequeño que integra *finance* y *green finance*, lo que refleja el papel emergente de las finanzas sostenibles como mecanismo para acelerar la transición hacia una industria verde.

En la figura 1.3, el mapa de densidad resalta los términos con mayor presencia e interconexión dentro de la literatura analizada. El núcleo más intenso corresponde a *sustainability*, lo que confirma su rol central como categoría transversal en los estudios sobre industria verde. En torno a este nodo se distinguen áreas de alta concentración asociadas con *green economy* y *environmental sustainability*, que reflejan los enfoques dominantes en las discusiones académicas actuales.

Figura 1.3. Mapa de densidad



Fuente: elaboración propia.

Asimismo, se observa una densidad relevante en torno a *policy implementation* e *industrial policy*, lo que indica que la dimensión regulatoria y de gobernanza se ha convertido en un eje de investigación clave, particularmente en países que buscan alinear su política industrial con objetivos de sostenibilidad.

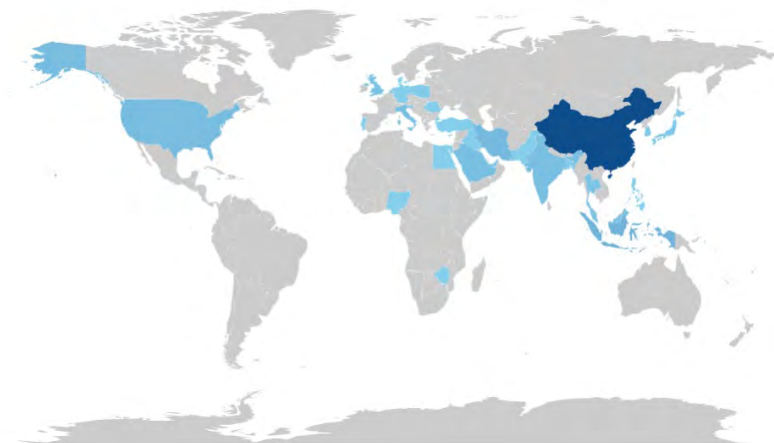
En la figura 1.4 la distribución geográfica muestra una marcada concentración de la producción científica en torno a un grupo reducido de países. China se posiciona como el actor más destacado, liderando de manera clara en número de publicaciones, lo que refleja su estrategia de posicionarse como referente global en transición energética, manufactura sostenible y políticas industriales verdes.

Estados Unidos aparece como el segundo país con mayor aporte, consolidando su rol en la producción de conocimiento vinculado a innovación tecnológica y diseño de políticas de descarbonización.

En Europa, destacan contribuciones relevantes de Alemania, Reino Unido y países nórdicos, con una fuerte tradición en economía circular y políticas ambientales. En contraste, América Latina y África presentan una participación limitada, con casos aislados de publicaciones en México, Bra-

sil y Sudáfrica. Esta baja representación evidencia tanto la falta de financiamiento en investigación especializada como la ausencia de políticas industriales verdes consolidadas en varios países en desarrollo.

Figura 1.4. Productividad científica por país



Fuente: elaboración propia.

En la figura 1.5 el análisis de estructura conceptual revela cómo se organiza la literatura sobre industria verde, sostenibilidad y políticas en tres grandes ejes.

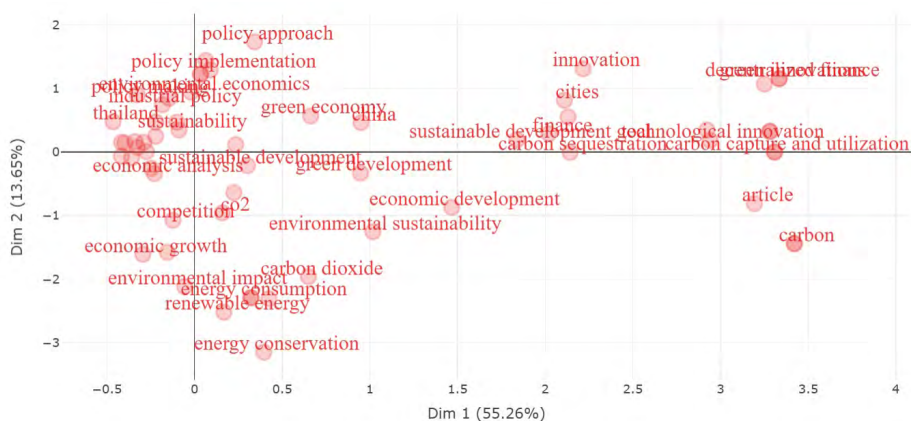
El primero corresponde al ámbito político-institucional, donde términos como *policy implementation* e *industrial policy* reflejan la relevancia de los marcos regulatorios en la transición industrial.

El segundo eje destaca la innovación y el financiamiento verde, con conceptos como *innovation*, *green finance* y *technological innovation*, lo que muestra que las finanzas sostenibles y la investigación tecnológica se reconocen como motores clave del cambio estructural.

Finalmente, el tercer eje agrupa la dimensión ambiental-energética, con énfasis en *carbon dioxide*, *energy consumption* y *renewable energy*, que representan los esfuerzos por reducir emisiones y mejorar la eficiencia en los procesos productivos.

La importancia de este análisis radica en evidenciar la naturaleza interdisciplinaria del campo, donde economía, ambiente y políticas convergen, ofreciendo lecciones estratégicas para países como México.

Figura 1.5. Análisis de estructura conceptual

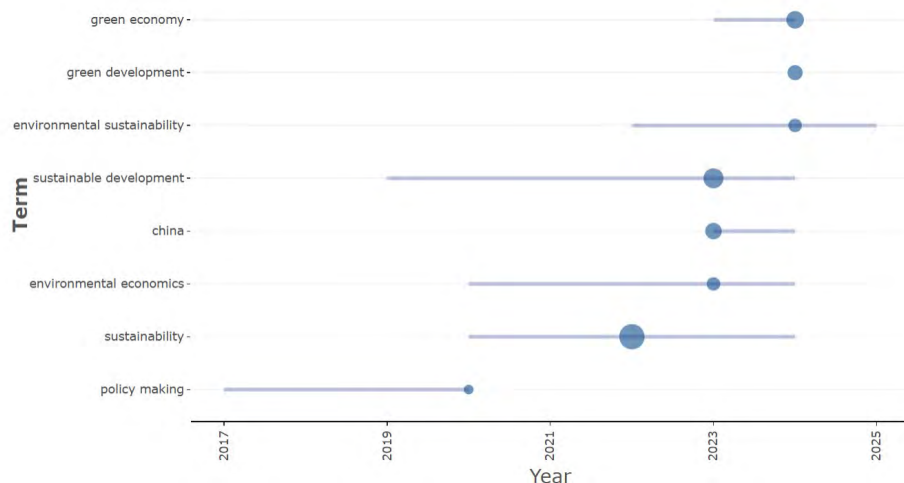


Fuente: elaboración propia.

La figura 1.6 muestra que la evolución temática refleja cómo ciertos conceptos han adquirido relevancia en la literatura sobre industria verde en los últimos años. Entre 2017 y 2020 predominaban términos vinculados a *policy making* y *sustainable development*, lo que muestra el énfasis inicial en los marcos regulatorios y en la integración de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

A partir de 2020 se observa un crecimiento sostenido en el uso de *sustainability* y *environmental economics*, consolidándose como ejes centrales de investigación. Este periodo coincide con la intensificación de los compromisos internacionales de descarbonización y el fortalecimiento de las agendas de recuperación verde pospandemia. Más recientemente (2022-2024), los términos *green economy*, *green development* y *environmental sustainability* se han posicionado como tópicos emergentes, reflejando un cambio hacia enfoques más integrales que vinculan economía, innovación y sostenibilidad ambiental.

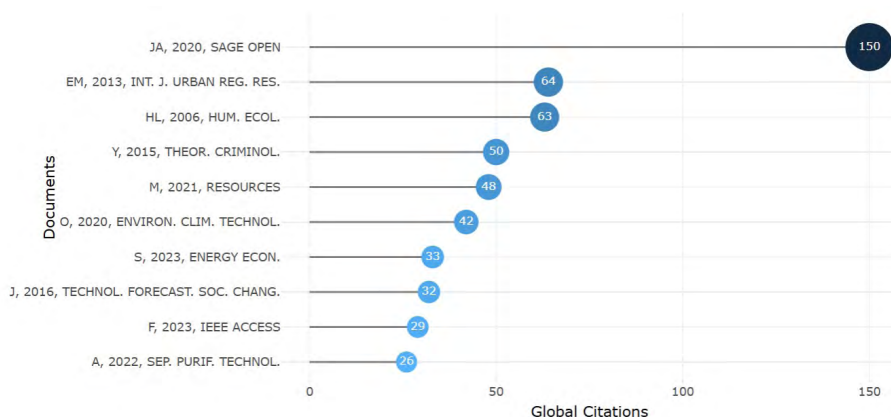
Figura 1.6. Evolución temática



Fuente: elaboración propia.

La figura 1.7 muestra los artículos con mayor impacto medido en citas globales. Destaca un trabajo publicado en SAGE Open (2020), con 150 citas, lo que lo convierte en el documento más influyente dentro del campo. Este resultado evidencia la centralidad de estudios de carácter conceptual y metodológico que han orientado la discusión sobre sostenibilidad e industria verde. Otros artículos relevantes se publicaron en revistas como *International Journal of Urban and Regional Research* (2013, 64 citas), *Human Ecology* (2006, 63 citas) y *Theoretical Criminology* (2015, 50 citas). Si bien no todos se centran exclusivamente en la industria verde, sus enfoques interdisciplinarios en torno a sostenibilidad, economía ambiental y políticas de desarrollo han permeado el debate actual.

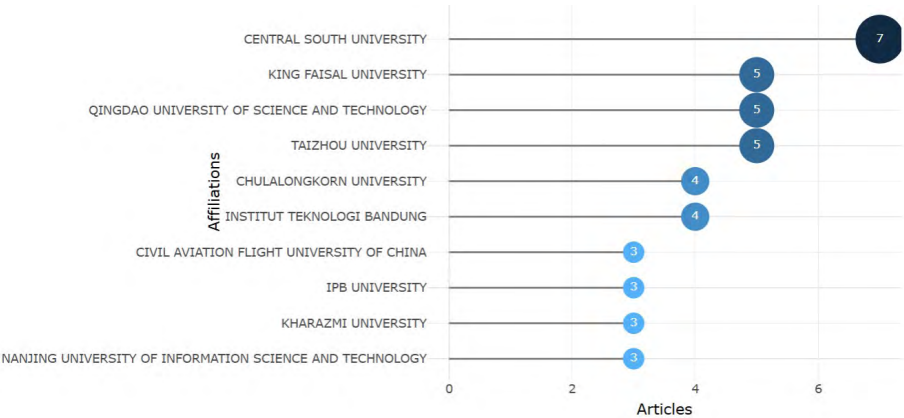
Figura 1.7. Artículos con mayor impacto



Fuente: elaboración propia.

La figura 1.8 muestra las afiliaciones con mayor número de publicaciones en el área de industria verde, sostenibilidad y políticas. Destaca la Central South University (China) como la institución líder, con siete artículos, lo que refleja el protagonismo del país asiático en la investigación aplicada a la transición industrial. Le siguen la King Faisal University (Arabia Saudita), la Qingdao University of Science and Technology (China) y la Taizhou University (China), cada una con cinco publicaciones, consolidando a la región asiática como el epicentro de la producción académica en este campo. De manera complementaria, instituciones como la Chulalongkorn University (Tailandia) y el Institut Teknologi Bandung (Indonesia) aportan cuatro artículos cada una, lo que sugiere un crecimiento de la investigación en el sudeste asiático. En menor medida participan universidades de Medio Oriente, África del Norte y América Latina, aunque su representación sigue sin tener un fuerte impacto.

Figura 1.8. Afiliaciones con mayor número de publicaciones



Fuente: elaboración propia.

Discusión

Tendencias y evolución de la literatura

La literatura sobre *industria verde*, *sostenibilidad* y *políticas públicas* ha crecido notablemente en las últimas décadas, reflejando la creciente preocupación global por alinear el desarrollo económico con la protección ambiental. En tiempos recientes, el tema ha cobrado especial protagonismo: con las crecientes preocupaciones por la sostenibilidad, se ha dirigido una atención significativa hacia la investigación en el dominio de la industria verde (Kim et al., 2024). Este auge se manifiesta no sólo en la cantidad de publicaciones, sino también en la diversificación de enfoques. En la etapa inicial, muchos trabajos tenían un carácter más conceptual o normativo, a menudo planteando la necesidad de un cambio de paradigma en las políticas de desarrollo. Por ejemplo, en economías emergentes como Filipinas ya se advertía hace casi una década que “no queda otra opción que adoptar un marco de desarrollo inclusivo, sostenible y verde, (...) lo que requiere dejar atrás el modelo neoliberal y adoptar una política industrial que promueva industrias verdes” (Ofreneo, 2015, p. 101).

Un cambio fundamental en la evolución del campo es la ampliación de las perspectivas analíticas. Investigaciones previas tendían a centrarse en aspectos aislados o en la visión gubernamental, pero los estudios más recientes abarcan una óptica más integral. Por ejemplo, en el ámbito de la gestión de residuos electrónicos en China se detectó que la investigación se había enfocado en la perspectiva gubernamental y el diseño de políticas, sin considerar cómo las industrias y otros actores perciben e implementan el sistema (Pongajow et al., 2025). Este estudio y otros similares marcan una evolución hacia la incorporación de *stakeholders* múltiples y la identificación de brechas en la implementación, señalando una maduración de la literatura.

Ejes conceptuales y enfoques interdisciplinarios

Los estudios sobre industria verde y sostenibilidad se articulan en torno a varios ejes conceptuales fundamentales, abordados mediante enfoques marcadamente interdisciplinarios. Un primer eje clave es la búsqueda de sinergias entre crecimiento económico y sostenibilidad ambiental. Evidencia reciente respalda esta premisa: una investigación con modelación macroeconómica en África demostró que la industrialización verde puede estimular el producto económico al tiempo que reduce las emisiones de carbono, garantizando un doble dividendo de prosperidad económica y sostenibilidad ambiental siempre que exista el apoyo político adecuado (Oye, 2025). Este hallazgo refleja el ideal conceptual central del campo: el desarrollo sostenible no es un juego de suma cero entre economía y medio ambiente, sino que puede lograrse un beneficio mutuo bajo ciertas condiciones.

En estrecha relación con lo anterior, se consolida el concepto de política industrial verde como instrumento de transición. Estas políticas se definen como medidas públicas orientadas a promover la adopción de tecnología verde en un marco de sostenibilidad (Chen et al., 2024). Aquí confluyen disciplinas de la ciencia económica, la gestión tecnológica y las políticas públicas, configurando un enfoque híbrido: por un lado, teoría económica y de innovación para justificar la intervención del Estado en corregir fallas de mercado ambientales; por otro, ciencia política y estudios

urbanos para diseñar políticas eficaces en contextos específicos. Un ejemplo es el análisis del efecto de incentivos gubernamentales en el sector financiero: se ha comprobado en China que políticas de apoyo a bonos verdes generaron un “*green premium*” en la banca, reduciendo las tasas de interés de esos bonos y mejorando la rentabilidad de los bancos emisores, lo cual refleja la mayor confianza de los inversionistas en instituciones que respaldan a la industria verde (Sheng y Montgomery, 2025).

Otro eje conceptual relevante es la integración de principios de economía circular y criterios ESG (ambientales, sociales y de gobernanza) en la agenda industrial. Se busca reformular los modelos de producción tradicionales hacia esquemas que minimicen residuos, imiten la eficiencia de los sistemas naturales (biomímesis) y atiendan la inclusión social. Hay una variedad de enfoques metodológicos empleados desde modelos econométricos y de equilibrio general para cuantificar impactos (Oye, 2025; Yao et al., 2025), hasta análisis narrativos de políticas y marcos normativos (Walk, 2024; Vilela et al., 2024), todos contribuyendo a un entendimiento más holístico de cómo la industria verde puede ser eje de una transformación sostenible integrando crecimiento, cuidado ambiental y justicia social a través de la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza (SbN).

Distribución geográfica y liderazgo institucional

El desarrollo de esta literatura presenta una distribución geográfica desigual, con ciertos países e instituciones académicas liderando la producción científica en industria verde y sostenibilidad. En particular, Asia se ha posicionado como núcleo central de investigación y experimentación en este campo. Numerosos estudios de caso y análisis de políticas provienen del contexto chino, reflejando el fuerte impulso político y académico del país hacia la sostenibilidad. Por ejemplo, investigaciones recientes abarcan desde evaluaciones de emisiones en cientos de ciudades chinas (Li et al., 2025) hasta análisis de las políticas industriales verdes piloto, implementadas en ciudades desde mediados de la década de 2000 (Chen et al., 2024). Estos trabajos no sólo evidencian la riqueza de datos disponibles en China, sino también su rol pionero al ensayar políticas públicas innovadoras. Las insti-

tuciones chinas ocupan un lugar prominente: universidades de élite y centros de la Academia China de Ciencias figuran recurrentemente entre los autores más citados (Liu et al., 2025), indicando un liderazgo institucional claro. Cabe señalar la frecuente colaboración entre organismos gubernamentales y académicos en estos estudios —por ejemplo, proyectos conjuntos de universidades como Tongji o Harbin con el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información de China— lo que sugiere un ecosistema sólido de *policy research* orientado a la acción.

Además de China, otros países asiáticos como Corea del Sur e India despiertan en contribuciones. En Corea, la atención se ha dirigido a temas financieros y empresariales, evidenciada por estudios sobre mercados de valores verdes (Kim et al., 2024) y el desempeño de empresas con modelos de negocio verdes. India, por su parte, aporta trabajos conceptuales y de gestión: desde Pune se exploró la integración de economía circular con criterios ESG (Wamane, 2023), sumando una perspectiva de economías emergentes con fuerte énfasis en inclusión social. Estas contribuciones asiáticas han diversificado la literatura que antaño pudo haber estado dominada por voces de Europa Occidental o Norteamérica. De hecho, Europa continúa teniendo un papel relevante, aunque de forma algo distinta: más que estudios de caso nacionales (relativamente escasos en comparación), Europa provee un liderazgo normativo y de agenda.

Un ejemplo es la serie de análisis en torno al paquete “Fit for 55” de la Unión Europea, que evalúan cómo esta ambiciosa estrategia climática afecta a distintos Estados miembros (Vilela et al., 2024). Dichos estudios resaltan el liderazgo europeo en establecer metas integrales (reducir 55% de emisiones a 2030) y en vincular objetivos ambientales con recuperación económica y justicia social. No obstante, también señalan los retos de disparidad regional dentro de la UE, donde países e instituciones deben coordinarse para implementar políticas homogéneas frente a capacidades económicas diversas (Vilela et al., 2024).

Lecciones y oportunidades para México

La experiencia internacional muestra que México tiene mucho por aprender y adaptar a su propio contexto. En África se ha visto que la industrialización verde sólo funciona cuando el gobierno impulsa instituciones sólidas y hace accesibles las tecnologías sostenibles (Oye, 2025). Algo similar aplica para los países MINT, donde se recomienda fomentar industrias verdes y políticas de conservación energética que acompañen el crecimiento urbano (Odugbesan y Rjoub, 2020).

En China, las políticas regionales han sido decisivas para llevar energías renovables a las zonas menos desarrolladas y reducir desigualdades internas (Liu et al., 2025). También es fundamental que la responsabilidad en temas como los residuos se comparta entre empresas, autoridades y ciudadanía, acompañada de educación y apoyos financieros (Pongajow et al., 2025). Finalmente, sin una sociedad consciente y participativa, especialmente entre la juventud, la transición verde difícilmente podrá sostenerse (Ogie-mwonyi et al., 2022).

Conclusión

En conclusión, México cuenta con una oportunidad extraordinaria para impulsar su propia agenda de industria verde aprendiendo de lo ya documentado globalmente. Las claves estarán en diseñar políticas integrales con visión de Estado, apuntaladas por instituciones fuertes; adaptar dichas políticas a las realidades regionales y sociales para que la transición sea inclusiva; fomentar la colaboración de todos los actores involucrados en la economía verde; y cultivar un entorno social proclive a la sostenibilidad mediante educación y sensibilización.

Aplicando estas lecciones provenientes de diversos contextos, pero convergentes en principios, México podría no sólo acelerar su camino hacia el desarrollo sostenible, sino también posicionarse como un referente latinoamericano en la transformación verde de la industria y las políticas públicas. Por lo tanto, es necesario invertir en educación ambiental, campañas de información y participación comunitaria que acompañen las iniciativas de

industria verde a través de un eje de cooperación entre las partes académica económica, política y social del país.

Referencias

- Altenburg, T. y Assmann, C. (Eds.). (2017). *Green industrial policy: Concept, policies, country experiences*. UN Environment & German Development Institute.
- Aria, M. y Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Chen, L., Chang, Y. y Ruan, X. (2024). The role of geographic distances in green industrial pilot policies evaluation: A sustainability transition perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(50), 60485-60502. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35199-1>
- Climate Transparency. (2020). *Climate transparency report 2020: Mexico*. Climate Transparency Partnership. <https://www.climate-transparency.org>
- Dos Santos, M. (2023, 24 de julio). *Desafíos y oportunidades para implementar y financiar la industria verde en la región*. Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe. <https://www.caf.com/es/blog/desafios-y-oportunidades-para-implementar-y-financiar-la-industria-verde-en-la-region/>
- Economics Observatory. (2025). *How could green energy policy boost Mexico's economy?* <https://www.economicsobservatory.com/how-could-green-energy-policy-boost-mexicos-economy>
- Kim, J., Ko, R. K. y Choi, W. (2024). Green business model and green media coverage for a successful initial public offering: Evidence from the Korean firms. *Sustainability*, 16(11), 4520. <https://doi.org/10.3390/su16114520>
- Liu, H., Xiong, J., Hong, S. y Zhou, B. (2025). Social, economic, and environmental development in China through the lens of synergies and trade-offs. *Journal of Cleaner Production*, 509, 145634. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145634>
- Nyangchak, N. (2022). Emerging green industry toward net-zero economy: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134622. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134622>
- Odugbesan, J. A. y Rjoub, H. (2020). Relationship among economic growth, energy consumption, CO₂ emission, and urbanization: Evidence from MINT countries. *Sage Open*, 10(2), 1-13. <https://doi.org/10.1177/2158244020914648>
- Ofreneo, R. E. (2015). Towards an inclusive, sustainable and green Philippine economy. *Institutions and Economies*, 7(1), 96-118.
- Ogiemwonyi, O., Harun, A. B., Alam, M. N. y Othman, B. A. (2022). Environmental awareness, green product value, and environmental attitude as drivers of green culture in Nigeria. *Environmental and Climate Technologies*, 26(1), 1047-1064. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0015>

- Oye, Q. E. (2025). The economic and environmental effects of greening industrialization in Africa: A dynamic stochastic general equilibrium approach. *Journal of Cleaner Production*, 513, 145656. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145656>
- Pongajow, V. D., Qin, Y., Xu, K., Liu, S., Zhang, Z. y Liu, F. (2025). Stakeholder perspectives on Extended Producer Responsibility (EPR) and e-waste management: A case study of China. *Journal of Environmental Science and Sustainable Development*, 8(1), 263-286. <https://doi.org/10.7454/jessd.v8i1.1331>
- Sheng, D. y Montgomery, H. A. (2025). The financial benefits of going green: An analysis of bank performance and policy impact in China. *Studies in Economics and Finance*, 42(3), 553-571. <https://doi.org/10.1108/SEF-08-2024-0481>
- United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). (2025, 29 de mayo). *América Latina: Integración regional para mejorar la industria verde y la resiliencia económica*. <https://unctad.org/es/news/america-latina-integracion-regional-para-mejorar-la-industria-verde-y-la-resiliencia-economica>
- Van Eck, N. J. y Waltman, L. (2021). VOSviewer: A computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 126(1), 3665-3682. <https://doi.org/10.1007/s11192-021-03983-2>
- Vilela, N. B., Castilhos, D. S., Murphy, A. M. y Oplotnik, Ž. J. (2024). EU's "Fit for 55" plan, its economic impact and intergovernmental perspective. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*, 8(9), 930-947. <https://doi.org/10.24294/jipd.v8i9.8445>
- Walk, P. (2024). From parity to degrowth: Unpacking narratives of a gender-just transition. *Energy Research & Social Science*, 103513. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103513>
- Wamane, G. V. (2023). A "New Deal" for a sustainable future: Enhancing circular economy by employing ESG principles and biomimicry for efficiency. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 36(4), 930-947. <https://doi.org/10.1108/meq-07-2022-0189>

2. Avances en el tratamiento sostenible del agua: Innovación tecnológica, competitividad económica e impacto ambiental*



JORGE ALEJANDRO SILVA RODRÍGUEZ DE SAN MIGUEL**

DULCE MARÍA MONROY BECERRIL***

MARÍA CONCEPCIÓN MARTÍNEZ RODRÍGUEZ****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.02>

Resumen

Este artículo analiza los avances en el tratamiento sostenible del agua considerando la innovación tecnológica, la competitividad económica y el impacto ambiental, debido a la creciente importancia del tratamiento eficiente del agua, a la escasez de recursos hídricos, al rápido crecimiento de la población mundial y los crecientes problemas ambientales. Para ello, se realiza una búsqueda sistemática de la literatura en la cual la parte teórica ilustra los principios del análisis del ciclo de vida, la economía circular, la química verde que guían la innovación, y la perspectiva histórica detalla que la evolución va desde sistemas químicos a membranas avanzadas y sistemas biológicos. Los hallazgos indican a través del análisis temático que la filtración por membrana, los procesos de oxidación avanzada y los tratamientos basados en nanotecnología tienen altas eficiencias de eliminación, pero enfrentan desafíos por el costo, la energía y problemas de

* Derivado del proyecto SIP 20240598: "Responsabilidad social empresarial y sostenibilidad en el abastecimiento de agua".

** Doctor en Ciencias Administrativas. Profesor del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-4696> ; correo electrónico: jasilva@ipn.mx

*** Doctora en Administración Pública. Profesora-investigadora del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0787-5577>

**** Doctora en Política Pública. Profesora del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>

ensuciamiento. Incorporar estrategias de recuperación de recursos en los modelos de negocios crea oportunidades para mejorar la viabilidad económica, al reducir los costos operativos. Los estudios destacan la importancia de las métricas de sostenibilidad, como la huella de carbono o las evaluaciones del ciclo de vida en la orientación de decisiones sobre adopción de tecnología. Nuevas tendencias están surgiendo aplicaciones de IA para la optimización en tiempo real, sistemas descentralizados y pilotos que demuestran la viabilidad en el mundo real. Pero las métricas inconsistentes, los datos limitados a largo plazo y las políticas siguen siendo lagunas urgentes de resolver. El análisis finaliza con un llamamiento a la investigación interdisciplinaria, metodologías adaptadas a las necesidades y regulaciones propicias para promover estos estudios disruptivos y lograr una seguridad hídrica equitativa.

Palabras clave: *competitividad, economía circular, filtración por membrana, procesos de oxidación avanzada, tratamiento sostenible del agua.*

Introducción

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático subraya que la escasez mundial de agua se está volviendo más grave debido a una combinación de crecimiento demográfico, industrialización y cambio climático (Dolan et al., 2021). El aumento de las temperaturas y el clima extremo empeoran la escasez de agua, especialmente en áreas ya estresadas (Huang et al., 2021) y aumentan la disparidad entre la demanda y la oferta de agua.

La importancia crítica de este tema ha llevado a un cambio de paradigma en la industria del tratamiento del agua hacia el desarrollo de métodos de tratamiento económicamente atractivos y ambientalmente benignos. Esto se debe a que, si bien las técnicas tradicionales (por ejemplo, cloración y filtración) producen problemas con el agua (Huang et al., 2021), las técnicas tradicionales han asegurado la calidad del agua, pero las tecnologías avanzadas son sustitución de técnicas tradicionales en el proceso: preocupaciones medioambientales y consumo energético.

La filtración por membrana, la purificación basada en nanotecnología y la desalinización solar se han basado en métodos de tratamiento tradicionales para mejorar tanto los patógenos eliminados como la eficiencia del tratamiento (Fitton et al., 2019), al tiempo que reducen los costos ambientales y económicos para promover la sostenibilidad global, objetivos de sostenibilidad.

Esta revisión busca evaluar la competitividad y el impacto ambiental de las últimas tecnologías de tratamiento de agua sostenible y factores como la preparación política y tecnológica que llevaron a su adopción. Se hace hincapié en la literatura a partir de 2019, con una perspectiva global, priorizando la investigación revisada por pares, pero dejando espacio para otras fuentes cuando éstas proporcionen adecuadamente perspectivas únicas. Al reunir dicha información, se destacan áreas prometedoras para futuras investigaciones e inversiones para abordar los problemas mundiales del agua.

Comprender los conceptos clave es un primer paso esencial para evaluar el uso sostenible del agua y tecnologías de tratamiento. En este contexto, la sostenibilidad se refiere a procesos hídricos que satisfacen los requerimientos actuales sin poner en peligro la disponibilidad futura o el bienestar ecológico (Selvakumar, 2025), destacando la eficiencia de los recursos y el menor daño al medio ambiente.

La competitividad mide el costo, la eficiencia, la escala y la adaptabilidad de los recursos tecnológicos frente a las soluciones existentes. Las tecnologías sostenibles más nuevas incluyen la filtración avanzada por membrana, nanomateriales y desalinización solar. La relación coste-efectividad evalúa la eficiencia financiera relativa de estas tecnologías, al tiempo que se sopesan sus beneficios, como la mejora de la calidad del agua y la reducción de la huella ambiental. Las soluciones de tratamiento son aquellas que minimizan los recursos y el impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida, y los sistemas competitivos tienen ventajas económicas y de rendimiento que promueven la penetración en el mercado.

La revisión de la literatura está estructurada para facilitar una comprensión clara y completa de los temas. Incluye una sección de métodos que explica los criterios de búsqueda y selección. Se utiliza una sección de marco teórico que proporciona perspectivas fundamentales, una sección de análisis temático que cubre metodologías y hallazgos, y una sección de con-

clusiones que resume los conocimientos y detecta lagunas en la investigación. Esto permite vincular la teoría con los últimos desarrollos, los usos y las perspectivas futuras para un mejor tratamiento sostenible del agua.

Método

Esta revisión sistemática se basó en una estrategia de búsqueda sistemática realizada de acuerdo con las pautas establecidas para identificar publicaciones relacionadas con el tratamiento sostenible del agua. Las búsquedas se realizaron en varias bases de datos, incluidas Web of Science, Scopus, PubMed y Google Scholar, utilizando combinaciones de palabras clave (por ejemplo, tratamiento sostenible del agua, relación coste-eficacia, evaluación económica). Se emplearon operadores booleanos y de truncamiento para refinar la búsqueda, lo que produjo literatura que abarca desde estudios publicados en 2019 hasta casi 2025, un periodo significativo especialmente considerando el aumento de los esfuerzos de investigación centrados en la sostenibilidad.

Se siguieron las pautas PRISMA 2020 para la inclusión: estudios con la innovación tecnológica, competitividad económica e impacto ambiental en el tratamiento del agua basados en evidencia empírica. En este sentido, se incluyeron publicaciones revisadas por pares. Por otra parte, se excluyeron los estudios que no eran directamente relevantes, no proporcionaban datos empíricos o se publicaban en idiomas distintos del inglés. La selección se realizó en dos etapas, primero con títulos y resúmenes, y segundo con revisiones de texto completo. Se logró un consenso a través de discusión o remitiéndose a un tercer revisor para conciliar discrepancias entre revisores.

Las herramientas utilizadas para la evaluación de la calidad incluyeron la lista de verificación PRISMA 2020 y las listas de verificación de evaluación crítica del Instituto Joanna Briggs para garantizar la confiabilidad. Se excluyeron los estudios que carecían de una metodología rigurosa, mientras que a los estudios con riesgo moderado de sesgo se les asignó una ponderación menor durante síntesis. En concreto, estudios de alta calidad.

Se hizo hincapié en proporcionar una evaluación sólida de las tecnologías innovadoras de tratamiento de agua de última generación, con un en-

foque en el uso de energía, la sostenibilidad ambiental y el costo. Este enfoque exhaustivo ayudó a garantizar que los resultados de la revisión fueran creíbles.

Marco teórico

Teorías y modelos fundacionales

Las tecnologías de tratamiento de agua sostenibles se desarrollan y adoptan debido a una combinación de marcos (ambientales, técnicos y sociotécnicos) que influyen su diseño y aceptación. Una de las herramientas centrales es el análisis del ciclo de vida (ACV) que considera los impactos ambientales de una tecnología desde la extracción de recursos hasta su eliminación (Şahin, 2024).

Este marco de referencia ayuda a identificar áreas de alta energía o carga química, utilizar y encontrar oportunidades para prácticas más sostenibles. A fines de octubre de 2023, las técnicas de ACV recientemente desarrolladas integraron conjuntos de datos localizados con factores de emisión para evaluaciones y productos regionales, revelando perspectivas más específicas sobre las compensaciones ambientales (Şahin, 224).

Los principios de la economía circular introducidos también complementan el ACV, priorizando, entre otros, la recuperación de recursos y la minimización de residuos, permitiendo ver los procesos de tratamiento de agua como oportunidades de recuperación y de subproductos valiosos como biogás y nutrientes (Şahin, 2024). Este enfoque integra el tratamiento del agua con el nexo más amplio agua-energía-alimentos que puede ayudar a lograr beneficios tanto ambientales como económicos.

Asimismo, la química verde destaca la importancia de diseñar los procesos para reducir el uso y generación de sustancias peligrosas y residuos, lo cual conduce a innovaciones como coagulantes ecológicos y disolventes no nocivos en procesos de oxidación avanzada (Şahin, 2024). Comprender la dinámica sociotécnica es fundamental a la adopción de nuevas tecnologías y se guía por marcos que incluyen la Difusión de Innovaciones de Rogers y la Perspectiva Multinivel (MLP).

Estos modelos examinan cómo las ventajas percibidas, la complejidad y los encuentros sociales influyen en la adopción de innovaciones (Şahin, 2024). Las políticas, la cooperación entre las partes interesadas y las herramientas financieras actúan como “facilitadores u obstáculos” para la adopción a gran escala y a largo plazo de innovaciones y métodos sostenibles (Şahin, 2024).

Los enfoques integrados consolidan cada vez más las consideraciones ambientales, económicas y sociales en un concepto común: el proceso de toma de decisiones (Şahin, 2024). La integración de datos de ACV, la economía circular, los objetivos y las contribuciones sociotécnicas permiten a las partes interesadas realizar un análisis integral de costo-beneficio para descubrir las mejores soluciones posibles. Esta perspectiva integral demuestra que el tratamiento sostenible del agua no sólo se trata de innovaciones tecnológicas (Şahin, 2024), sino también de gobernanza, comportamiento y dinámica del mercado. Alineando sus pilares, se puede lograr construir un método de tratamiento para cumplir con los objetivos ambientales, a pesar de los patrones sociales y económicos (Şahin, 2024).

Perspectivas históricas sobre el tratamiento del agua

El tratamiento del agua ha experimentado un desarrollo sustancial y continuo a lo largo del último siglo, se han utilizado desde métodos de reacción simples hasta sistemas complejos de múltiples etapas capaces de cumplir con requisitos de calidad del agua diferentes y más estrictos (Muhammad y Bendeckache, 2024). Los enfoques iniciales, como la desinfección química mediante cloración, desempeñaron un papel crucial en la prevención de infecciones transmitidas por el agua, pero también dieron lugar a subproductos de la desinfección que se convirtieron en motivo de preocupación (Muhammad y Bendeckache, 2024), lo que ha provocado mejoras en las dosis químicas y un interés en alternativas.

Con la introducción de la coagulación y la floculación, la filtración rápida con arena se convirtió en la columna vertebral de tratamiento convencional, eliminando sólidos suspendidos y patógenos (Muhammad y

Bendeche, 2024). Sin embargo, sus demandas energéticas y químicas son insostenible a largo plazo.

Un avance significativo ocurrió en la década de 1970 con la aparición de tecnologías basadas en membranas (Muhammad y Bendeche, 2024). Además, procesos como la ósmosis inversa y la nanofiltración comenzaron a eliminar una gama más amplia de contaminantes y resultaron útiles para combatir la escasez de agua facilitando su desalinización, aunque inicialmente fueran difíciles y costosas (Muhammad y Bendeche, 2024).

A finales del siglo xx, se desarrollaron Procesos de Oxidación Avanzada (POA) para reducir contaminantes persistentes a nivel molecular, pero eran procesos complejos y de alto consumo de energía, lo que restringía su absorción (Muhammad y Bendeche, 2024). Los métodos de tratamiento biológico, como los humedales construidos y los biofiltros, proporcionaron una opción más sostenible al utilizar microorganismos para disminuir la necesidad de uso de productos químicos (Muhammad y Bendeche, 2024).

Estos métodos estaban en armonía con los paradigmas ambientales, pero necesitaban implementación cuidadosa para garantizar la confiabilidad. En las últimas dos décadas, el panorama de la industria del tratamiento del agua se ha inclinado gradualmente hacia la sostenibilidad, impulsada por regulaciones cada vez más estrictas, limitaciones en los recursos hídricos y avances tecnológicos (Ahmad et al., 2022; Mao et al., 2021; Zhang et al., 2021), se enmarca en términos de contar con sistemas de tratamiento compactos, eficientes y rentables, sistemas posibilitados por los avances en la ciencia de membranas, la nanotecnología y la energía renovable (Ahmad et al., 2022; Mao et al., 2021; Zhang et al., 2021).

Las soluciones sostenibles se están haciendo posibles gracias a las asociaciones público-privadas y a las contribuciones de organizaciones internacionales, financiación y colaboración global en regiones con escasez de recursos. El enfoque incremental refleja una importancia más amplia en los métodos integrados, que se basan en el cambio de misión (que involucra aspectos ecológicos y económicos) (Ahmad et al., 2022; Mao et al., 2021; Zhang et al., 2021). Los avances logrados en el tratamiento del agua son un testimonio de una lucha constante por equilibrar el cumplimiento de requisitos de calidad cada vez más estrictos y la minimización de los impactos

ambientales y responder a las realidades económicas, siendo la sostenibilidad y la competitividad dos aspectos críticos para asegurar el agua para el futuro (Ahmad et al., 2022; Mao et al., 2021; Zhang et al., 2021).

Principales eruditos y escuelas de pensamiento

Una red mundial y activa de investigadores, instituciones y consorcios proporciona la fuerza impulsora detrás de los campos del tratamiento sostenible del agua, impulsando la innovación, debatiendo sus fundamentos teóricos y promoviendo la aplicación de tecnologías emergentes (Bijekar et al., 2022; Mishra y Singh, 2023; Singh et al., 2023).

Personas pioneras como Menachem Elimelech, Pedro J. J. Álvarez y Bruce E. Logan han tenido un gran impacto en dominios como la desalinización por membranas, las estrategias de nanotecnología y la recuperación de energía de las aguas residuales (Bijekar et al., 2022; Mishra y Singh, 2023; Singh et al., 2023). Desde la investigación hasta la política y el desarrollo de capacidades, instituciones líderes como Eawag, MIT, la Universidad de Carolina del Norte y consorcios internacionales como la Asociación Internacional del Agua y la Fundación de Investigación del Agua, representan una gran parte de las actividades en muchas regiones (Bijekar et al., 2022; Mishra y Singh, 2023; Singh et al., 2023).

Aunque hay consenso en cuanto a la necesidad crítica de un tratamiento sostenible y responsable con el medio ambiente del agua, el espacio está plagado de opiniones diferentes sobre qué tecnologías serán viables, escalables y asequibles. Los defensores de soluciones de alta tecnología afirman que existen tecnologías superiores, como los sistemas de membranas, los nanomateriales y la optimización impulsada por IA son más adecuados para abordar problemas complejos del agua (Bijekar et al., 2022; Mishra y Singh, 2023; Singh et al., 2023). Por el contrario, los defensores de los enfoques de baja tecnología, como los bios y los filtros y la desinfección solar, enfatizan su simplicidad, asequibilidad y facilidad de uso en entornos con recursos limitados (Bijekar et al., 2022; Mishra y Singh, 2023; Singh et al., 2023).

Se sostiene que los sistemas centralizados son eficientes y permiten economías de escala, mientras que los enfoques descentralizados son flexibles

para comunidades remotas, pero operativamente problemáticos (Ehalt et al., 2022; He et al., 2022; Obaideen et al., 2022). Aún incluso las consideraciones de costos polarizan el campo: los procesos avanzados tienen el potencial de generar ahorros a largo plazo debido a una mayor durabilidad y eficiencia energética, pero para muchas regiones con fondos insuficientes, los críticos citan su relativa inaccesibilidad (Ehalt et al., 2022; He et al., 2022; Obaideen et al., 2022). En una línea similar, la tensión entre las guías ambientales, como los principios económicos circulares y de baja energía, y los imperativos económicos, como los de corto plazo. El retorno de la inversión informa tanto las estrategias de investigación como las de implementación (Ehalt et al., 2022; He et al., 2022; Obaideen et al., 2022).

Estos debates ponen de relieve la tensión actual entre la promesa de una nueva tecnología y su valor final. Enfoques híbridos que equilibran sistemas de alta eficiencia con alcance y facilidad. Han surgido nuevas formas de uso y facilidad de uso para gestionar estas prioridades en pugna (Ehalt et al., 2022; He et al., 2022; Obaideen et al., 2022). En el futuro, se necesitarán soluciones personalizadas que tengan en cuenta las características locales, ecosistémicas y socioeconómicas. El medio ambiente será esencial para lograr equidad y eficacia en la prestación de la seguridad hídrica mundial para las tecnologías de tratamiento del agua (Ehalt et al., 2022; He et al., 2022; Obaideen et al., 2022).

Debates o controversias en curso

Los diálogos sobre los costos, la escalabilidad y las implicaciones políticas, y los desafíos para la transferencia de tecnología ya se han reflejado con la diversidad regional en un consenso permanente hacia la adopción global (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024). Un desafío importante es la viabilidad económica de técnicas más avanzadas, incluidos biorreactores de membrana o tratamientos basados en nanotecnología.

Los partidarios elogian los principales argumentos en favor de estas tecnologías como la mayor calidad del agua que producen y las economías de escala que podrían hacerlas rentables a largo plazo, mientras que los

opositores se preocupan por las elevadas inversiones iniciales y los costes operativos, especialmente en zonas de bajos ingresos (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024). Esto ha llevado a algunos académicos a pedir soluciones híbridas o de baja tecnología que puedan lograr un equilibrio entre bajo coste y alto rendimiento, pero que deben adaptarse con cuidado a las condiciones locales.

Otro gran obstáculo para escalar las tecnologías basadas en grafeno es tratar de implementarlas en la práctica; mientras que las tecnologías más nuevas, aunque los métodos como las membranas basadas en grafeno o la oxidación electroquímica resultan prometedores a menor escala, es más difícil optimizarlos y utilizarlos en sistemas polares. Sin subsidios o un entorno de políticas que recompense las soluciones respetuosas con el clima, estos problemas (ensuciamiento de las membranas, demanda de energía, complejidad de mantenimiento) a menudo conducen a soluciones tecnológicas que no son rentables (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024), lo que genera inconsistencias en las evaluaciones de preparación tecnológica.

Los diversos marcos regulatorios también complican la adopción, ya que, si bien algunas regiones pueden justificar tratamientos avanzados debido a los estrictos estándares de calidad del agua, las limitaciones socioeconómicas en otras justifican soluciones menos sofisticadas (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024). Además, las regulaciones que cambian rápidamente, en respuesta a los contaminantes emergentes, aumentan la incertidumbre y plantean un desafío para que las partes interesadas busquen tecnologías específicas sin riesgo de obsolescencia (Abdelfattah y El-Shamy, 2023; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024). La variación regional también afecta la implementación, ya que las comunidades rurales y remotas enfrentando barreras para acceder al equipo, habilidades y apoyo institucional necesarios para la implementación de sistemas de alta tecnología.

Esto destaca la necesidad de enfoques sensibles al contexto que adapten las tecnologías a los entornos socioeconómicos y ambientales locales, lo que permite un acceso equitativo al agua limpia (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024). Estos desafíos se ven agravados por los hallazgos inconsistentes en varios estudios, con tecnolo-

gías avanzadas como los sistemas de membranas y los procesos de oxidación que muestran diferentes niveles de eficiencia y la creación de subproductos no deseados que dependen de lo que se haga en el experimento y las características de la calidad del agua local (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024).

Estas inconsistencias fragmentan el conocimiento disponible para los responsables de las políticas y los profesionales, lo que dificulta las decisiones sobre su uso a gran escala (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024). Para superar estas brechas, los investigadores apoyan el trabajo interdisciplinario, uniendo los aspectos técnicos, económicos y de políticas que utilizan herramientas como el cálculo del costo del ciclo de vida y el modelado de sistemas (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024). Estos enfoques holísticos buscan encontrar soluciones viables que se ajusten a las condiciones locales y alineen las regulaciones para fomentar la innovación sin agregar altos costos. Descifrar este debate es esencial para desarrollar tecnologías de tratamiento del agua que sean ambientalmente sostenibles y socialmente equitativos (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Egbemhenghe et al., 2023; Nwokediegwu et al., 2024).

Metodologías y enfoques tecnológicos

Métodos de tratamiento convencionales y avanzados

Al igual que estas bacterias dañinas, las tecnologías de tratamiento del agua también han progresado, desde métodos de tratamiento, como la cloración y coagulación-floculación, hasta tecnologías avanzadas, como membranas, fotocátalisis y nanotecnología (Shoshaa et al., 2023). Históricamente, el uso de métodos tempranos (por ejemplo, coagulación, floculación, sedimentación y desinfección) ha sido eficaz para la desinfección de patógenos y la eliminación de turbidez, pero ha generado inquietudes sobre la desinfección por producto, el uso de químicos y los altos volúmenes de lodos, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas sustentables (Shoshaa et al., 2023).

Las tecnologías de filtración por membrana, incluidas la ultrafiltración y la ósmosis inversa, proporcionan una mejor protección contra patógenos y rechazo de contaminantes frente a métodos convencionales, con menores insumos químicos (Chaukura, 2020). Los altos requerimientos energéticos y el ensuciamiento son dos de los principales desafíos para estos sistemas, que aumentan tanto los costos como las emisiones de huellas de carbono (Chaukura, 2020). Sin embargo, las mejoras en la recuperación de energía y los materiales antiincrustantes se han orientado a mitigar estos problemas, pero su eficacia depende en gran medida del contexto operativo específico (Chaukura, 2020).

La fotocatalisis impulsada por energía solar que utiliza materiales como el dióxido de titanio ha demostrado su potencial para la desinfección y la lucha contra contaminantes emergentes descomposición, incluidos productos farmacéuticos y pesticidas (Muscetta et al., 2024). Aunque es ambientalmente atractivo, la implementación a gran escala tendría desafíos en cuanto a catalizadores eficientes, diseños ideales de reactores y exposición continua a la luz solar, por lo que su relación costo-beneficio sigue siendo objeto de un escrutinio poco activo (Muscetta et al., 2024).

Tratamientos basados en nanotecnología, empleando materiales como el óxido de grafeno y los nanotubos de carbono, muestran una eficacia significativa en la eliminación de metales pesados, microplásticos y otros contaminantes complejos (Liu et al., 2021). A pesar de sus ventajas, la adopción a gran escala se ha visto obstaculizada por preocupaciones sobre la estabilidad, la toxicidad y las implicaciones ecológicas, los altos costos y la complejidad de la fabricación (Liu et al., 2021). Se necesitan evaluaciones rigurosas del ciclo de vida y regulaciones más transparentes para guiar su desarrollo y aplicación (Liu et al., 2021).

Eficiencia, costo y el impacto ambiental se suele tener en cuenta al evaluar las tecnologías de tratamiento del agua (Hamel y Tan, 2022; Jan et al., 2021). Aunque son bien conocidos por su eficiencia en la eliminación de contaminantes, los sistemas de membranas enfrentan desafíos para controlar los costos operativos, mientras que la fotocatalisis impulsada por energía solar es respetuosa con el medio ambiente y es seguro para que lo utilicen los humanos, pero carece de escalabilidad (Hamel y Tan, 2022; Jan et al., 2021). Los enfoques convencionales más eficaces pueden proporcionar be-

neficios a corto plazo, pero no necesariamente se traducen en sostenibilidad a largo plazo (Hamel y Tan, 2022; Jan et al., 2021). La selección de tecnología ideal debe ser económicamente comparativa según la calidad del agua local, la red o la región (Hamel y Tan, 2022; Jan et al., 2021). La perspectiva contextualizada que informa diseños y asociaciones específicos conduce rápidamente a avances incrementales en campos relacionados en todo el mundo basados en la competitividad en precio, rendimiento y sostenibilidad (Hamel y Tan, 2022; Jan et al., 2021).

Innovaciones en la recuperación de recursos y la gestión circular del agua

La recuperación de recursos y la gestión circular del agua han surgido como principios duales centrales para el tratamiento sostenible del agua, redefiniendo las aguas residuales como una reserva fértil de materiales y energía valiosos. Actualmente, hay nuevos desarrollos haciendo hincapié en la recuperación y reutilización de nutrientes (por ejemplo, fósforo y nitrógeno) esenciales para la agronomía (Faragó et al., 2021; Preisner et al., 2022). Por ejemplo, las técnicas de precipitación de estruvita recuperan estos nutrientes para su uso como fertilizantes y los procesos biológicos como el anamox permiten la recuperación de nitrógeno con bajos requerimientos de energía (Faragó et al., 2021; Preisner et al., 2022).

En el ámbito industrial, los metales se pueden recuperar de las aguas residuales industriales, como metales pesados y preciosos, mediante procesos como la recuperación electroquímica y la biosorción. Aunque es eficaz, la escalabilidad de estas tecnologías requerirá inversiones significativas, regulaciones sólidas y sistemas seguros de gestión de residuos (Faragó et al., 2021; Preisner et al., 2022).

La recuperación energética también ha avanzado, incluyendo ahora la digestión anaeróbica de lodos de depuradora para producir biogás para ayudar a satisfacer las necesidades energéticas de la planta de tratamiento. Mejoras como la codigestión con restos de comida ha aumentado las emisiones de metano (Adeloju, 2024; Gautam et al., 2023). Los sistemas bioelectroquímicos, como las células de combustible microbianas, con-

vierten los desechos orgánicos en electricidad o gas hidrógeno. Aunque son prometedores, estos sistemas implican desafíos en términos de su complejidad operativa y escalabilidad; se necesita más investigación para integrarlos de manera efectiva a la infraestructura existente (Adeloju, 2024; Gautam et al., 2023).

La gestión circular del agua adopta un enfoque de sistema integral, implementando tecnologías complementarias, incluida la filtración por membrana, la digestión anaeróbica y la recuperación de nutrientes para formar sistemas de circuito cerrado. Este modelo es coherente con la economía circular y prácticas que implican la conversión de subproductos como los biosólidos en insumos agrícolas y, al mismo tiempo, la reutilización de los efluentes tratados para el riego (Czuba et al., 2021; Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Esto se ejemplifica en el nexo agua-energía-alimentos (WEF) que está proporcionando el impulso para los vínculos intersectoriales entre las instalaciones de tratamiento de agua, la agricultura y la industria para reciclar recursos y aumentar la sostenibilidad (Czuba et al., 2021; Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Aprovechando el agua, los nutrientes y la energía recuperados, los proyectos del WEF ayudan a mejorar la eficiencia de los recursos, reducir los costos y los impactos ambientales, en un contexto de políticas e incentivos propicios (Czuba et al., 2021; Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

La adopción de dichas tecnologías, especialmente en las regiones en desarrollo, es limitada debido a los altos costos de capital, la necesidad de conocimientos técnicos y diversos obstáculos regulatorios (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). La aceptación pública de los productos recuperados también es un problema, ya que los consumidores pueden considerar productos contaminados o desagradables. Y el creciente apoyo a través de marcos de políticas y proyectos piloto indican un buen terreno para el consumo masivo (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). A medida que estos métodos se validan mediante investigaciones y asociaciones con empresas fuera de nuestro sector de crecimiento, las aguas residuales se reconocen cada vez más como un vector para el desarrollo sostenible (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Competitividad económica

La relación coste-eficacia es fundamental para la adopción de nuevas tecnologías de tratamiento del agua, especialmente en mercados con escasez de datos o con una alta demanda de consumo que exigen rendimientos mensurables (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Se emplean enfoques de análisis de costes, como las evaluaciones del coste del ciclo de vida (LCCA) y las métricas de retorno de la inversión (ROI), para evaluar la viabilidad de los tratamientos convencionales (por ejemplo, coagulación-floculación y cloración), así como de los sistemas avanzados (por ejemplo, filtración por membranas, nanotecnología y estrategias de recuperación de recursos) (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Estos análisis se realizan teniendo en cuenta factores como los gastos de capital (CAPEX), los gastos operativos (OPEX), los requisitos de mantenimiento y los ingresos que pueden resultar de la recuperación de cualquier recurso o energía producida y, de ese modo, proporcionan una visión general de la viabilidad a largo plazo (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Los métodos de tratamiento más escalables, como la ósmosis inversa y los tratamientos basados en nanomateriales, pueden ser más eficaces para eliminar contaminantes que los métodos tradicionales, ya que ofrecen opciones que utilizan menos productos químicos en general, lo que reduce el costo a lo largo del tiempo (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Pero estos ahorros pueden verse anulados por sus altos costos iniciales y las necesidades de mantenimiento especializado, a menos que existan condiciones propicias para su uso (como economías de escala, regulación favorable o proximidad a industrias que necesitan agua tratada) (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Por otra parte, las soluciones híbridas o de baja tecnología más asequibles, como la filtración de arena mejorada acompañada de digestión anaeróbica, pueden resultar menos rentables como inversión inicial y es posible que no se adapten al riguroso marco regulatorio o a la cambiante calidad del agua (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). En consecuencia, las opciones de adopción dependen en gran medida del contexto y están determinadas por el costo económico local de la energía,

las condiciones laborales y los marcos de gobernanza (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Existen factores que impulsan la reducción de costos en las tecnologías de tratamiento del agua. Esto crea economías de escala para implementaciones a gran escala, con costos unitarios más bajos para sistemas basados en membranas o nanotecnología (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). De hecho, la investigación y los avances tecnológicos, incluidos los recubrimientos antiincrustantes y los métodos de desalinización de bajo consumo energético, han reducido los requisitos energéticos y la vida útil de los equipos (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Recuperación integrada de recursos: combinar el tratamiento de aguas residuales con la bioenergía o la recuperación de nutrientes puede compensar los costos mediante la generación de ingresos. Los gobiernos también participan en la implementación de tecnologías más costosas mediante asociaciones público-privadas, subsidios y beneficios fiscales (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Cada solución de tratamiento de agua es específica para cada caso y no existe una solución universal, ya que las soluciones rentables dependen de las características locales del agua, los requisitos reglamentarios y las condiciones socioeconómicas (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Es fundamental realizar un análisis integral de costo-beneficio, considerando las evaluaciones del ciclo de vida y los factores “externos” (por ejemplo, los beneficios para la salud o las emisiones de carbono) para determinar las inversiones más responsables desde el punto de vista económico y ambiental en función de las condiciones específicas de los contextos rurales de Etiopía (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Impacto ambiental y métricas de sostenibilidad

El impacto ambiental de las tecnologías de tratamiento del agua es cada vez más importante para la toma de decisiones, y la sostenibilidad ahora abarca no sólo la calidad del agua, sino también el consumo de energía, las emisiones de carbono, el uso de productos químicos y la recuperación de recursos (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Métricas como la

huella de carbono, la demanda de energía y la generación de desechos son clave para evaluar el desempeño ambiental y ofrecen información sobre las compensaciones tanto ecológicas como económicas (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Las evaluaciones de la huella de carbono rastrean las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del ciclo de vida de los sistemas de tratamiento, desde la construcción hasta el desmantelamiento (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Los métodos avanzados como la filtración por membrana a menudo reducen el uso de productos químicos, pero pueden aumentar las demandas de energía, lo que eleva las emisiones de carbono. Por el contrario, los enfoques de recuperación de recursos como la digestión anaeróbica pueden compensar las emisiones generando biogás renovable (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

De manera similar, el uso de energía varía según las tecnologías: los sistemas de alta presión, como la ósmosis inversa, son eficientes, pero consumen mucha energía. La investigación sobre dispositivos de recuperación de energía y materiales avanzados busca mitigar estos desafíos (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). La generación de desechos influye aún más en la sostenibilidad, ya que los procesos tradicionales producen lodos que requieren una eliminación cuidadosa, mientras que los sistemas avanzados pueden generar salmueras o catalizadores residuales que también exigen atención (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Los marcos de referencia como los índices de sostenibilidad y las directrices de la Global Reporting Initiative (GRI) ofrecen formas estructuradas de evaluar los sistemas de tratamiento de agua en sus dimensiones ambientales, económicas y sociales (Issaoui et al., 2022; Tarpeh y Chen, 2021). Los índices de sostenibilidad combinan métricas como el uso de energía, las emisiones y el potencial de recuperación de recursos para facilitar las comparaciones de tecnologías, mientras que los estándares GRI alientan a las empresas de servicios públicos a divulgar sus impactos ambientales y sociales (Issaoui et al., 2022; Tarpeh y Chen, 2021). Las evaluaciones del ciclo de vida (LCA) proporcionan evaluaciones detalladas de los impactos ambientales desde el principio hasta el fin y pueden integrarse con análisis tecnoeconómicos para realizar evaluaciones integrales de la sostenibilidad (Issaoui et al., 2022; Tarpeh y Chen, 2021).

La estandarización de estas evaluaciones sigue siendo un desafío. Las variaciones en las metodologías, las unidades y los supuestos dificultan las comparaciones directas entre estudios (Ayach et al., 2024; Ramírez-Agudelo et al., 2021). Las tecnologías emergentes, que a menudo se evalúan utilizando datos a escala piloto, introducen más incertidumbres y complican las decisiones de inversión y políticas (Ayach et al., 2024; Ramírez-Agudelo et al., 2021). La transparencia de los informes y los marcos coherentes son esenciales para captar con precisión las implicaciones ambientales, económicas y sociales de las diferentes opciones de tratamiento del agua (Ayach et al., 2024; Ramírez-Agudelo et al., 2021).

A medida que mejoran las métricas y los marcos de sustentabilidad, se vuelven cada vez más influyentes en la configuración de las inversiones en infraestructura, las políticas regulatorias y la aceptación pública (Ayach et al., 2024; Tarpeh y Chen, 2021). Al integrar medidas sólidas de desempeño ambiental con herramientas integrales de toma de decisiones, las partes interesadas pueden priorizar soluciones de tratamiento de agua escalables, rentables y ecológicamente responsables, abordando los desafíos hídricos globales de manera más efectiva (Ayach et al., 2024; Tarpeh y Chen, 2021).

Tendencias emergentes y debates

Debido al aumento en las demandas mundiales de agua, se están realizando investigaciones para hacer el proceso más eficiente, tener un menor impacto ambiental, además de tener acceso a agua potable. Tratamiento de agua: nuevos desarrollos (Abdelfattah y El-Shamy, 2024) y las innovaciones en nanomateriales y membranas avanzadas están transformando el tratamiento del agua. El óxido de grafeno, los nanotubos de carbono y otros materiales porosos son buenos candidatos para eliminar contaminantes persistentes (metales pesados y/o productos farmacéuticos), gracias a su gran área superficial y propiedades ajustables (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Ramírez-Agudelo et al., 2021).

Membranas de próxima generación, como las de película fina, los composites y diseños bioinspirados también proporcionan una alta permeabilidad y una excelente resistencia al ensuciamiento (Abdelfattah y El-Shamy,

2024; Ramírez-Agudelo et al., 2021). Las membranas híbridas que incorporen capacidades fotocatalíticas y/o adsorptivas facilitan no sólo la filtración, también la degradación de contaminantes, pero persisten desafíos relacionados con la escalabilidad y el impacto ambiental (Abdelfattah y El-Shamy, 2024; Ramírez-Agudelo et al., 2021).

El aprendizaje automático (ML) es conocido por restaurar datos a partir de hechos históricos. *Big data* y los modelos de aprendizaje automático permiten el monitoreo en tiempo real y el mantenimiento predictivo de los caudales, la dosificación de productos químicos y la limpieza de membranas para minimizar el consumo de energía y disminuir los costos operativos. Las empresas de servicios públicos utilizan sistemas de apoyo a la toma de decisiones basados en IA con sensores de IoT para responder a los cambios en la calidad del agua e identificar opciones de tratamiento rentables (Maniam et al., 2022; Obiuto et al., 2024). Pero, a medida que estas tecnologías se integran (Maniam et al., 2022; Obiuto et al., 2024), las preocupaciones sobre la ciberseguridad y la gestión de datos están aumentando.

Los sistemas de tratamiento descentralizados se están volviendo populares en áreas remotas o áreas desatendidas. Por ejemplo, biorreactores de membrana o energía solar. Las unidades de desinfección son sistemas modulares que pueden suministrar agua limpia *in situ*, eliminando así la necesidad de una costosa infraestructura de distribución (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Los proyectos piloto en áreas con menor acceso a agua limpia, como África subsahariana y Asia rural, muestran cómo las preferencias locales y los contextos culturales pueden detectar la descentralización (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Sin embargo, la sostenibilidad de estas iniciativas depende en gran medida del apoyo técnico y la financiación continuos, lo que hace necesario el desarrollo de capacidades para una integración exitosa a largo plazo (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Estas líneas de investigación significan un progreso vital hacia la solución de los problemas mundiales del agua, al tiempo que se garantiza también la sostenibilidad, la asequibilidad y la disponibilidad.

Barreras de implementación y consideraciones de política

A pesar de la promesa de nuevas tecnologías de tratamiento del agua, existen muchas barreras para su uso. Existe un uso generalizado, impulsado por factores regulatorios, sociales y económicos (Issaoui et al., 2022; Shehata et al., 2023). Los estándares de calidad del agua en las distintas jurisdicciones generan restricciones regulatorias, ya que obstaculizan la viabilidad de la comercialización global para los desarrolladores de tecnología (Issaoui et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Las definiciones de contaminantes y los límites aceptables varían entre países industrializados, lo que dificulta aún más la implementación internacional. La puntualidad en la implementación es sensible al escepticismo público, especialmente para sistemas nuevos como los tratamientos basados en IA o nanotecnología, lo que revela las implicaciones para la transparencia en la comunicación y la disponibilidad de datos de desempeño significativos (Issaoui et al., 2022; Shehata et al., 2023).

En las regiones en desarrollo, la adopción se ve obstaculizada por desafíos en materia de creación de capacidad. El uso de estas tecnologías avanzadas requiere conocimientos especializados; sin embargo, la capacitación existente es inadecuada y existe una alta rotación de personal (Adam et al., 2022; Ahmed et al., 2022). Además, la infraestructura puede ser un factor limitante: una red de energía variable o una cadena de suministro inestable pueden dificultar la implementación y el mantenimiento de sistemas modulares o de alto consumo energético (Adam et al., 2022; Ahmed et al., 2022). La financiación difícil agrava estos problemas porque la financiación continua es crucial para sostenibilidad operativa a largo plazo (Adam et al., 2022; Ahmed et al., 2022).

Las asociaciones e iniciativas desempeñan un papel fundamental a la hora de abordar estas barreras. Las Asociaciones Público-Privadas (APP) contribuyen a la puesta en común de recursos y en compartir riesgos, lo que hace posible proyectos piloto y soluciones escalables (Issaoui et al., 2022; Tarpeh y Chen, 2021). Los costos de entrada que enfrentan las empresas emergentes se minimizan mediante incentivos gubernamentales, como subsidios y subvenciones, mientras que la financiación basada en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU incentivará la inversión en infraestruc-

tura hídrica equitativa y sostenible, desempeñando un papel importante para ayudar a la inversión (Issaoui et al., 2022; Tarpeh y Chen, 2021). Los consorcios de estudios científicos regionales fomentan el intercambio de conocimientos y la estandarización de las mejores prácticas, lo que genera mejor trabajo conjunto en desafíos compartidos en materia de agua (Issaoui et al., 2022; Tarpeh y Chen, 2021).

El vínculo entre el cambio tecnológico y la realidad técnica resaltan la importancia de la formulación de políticas sólidas, la participación de diferentes partes interesadas y el desarrollo continuo de capacidades (Ramírez-Agudelo et al., 2021). Abordar estos obstáculos es esencial para abrir caminos hacia soluciones de tratamiento del agua a escala mundial que tengan un impacto en diferentes contextos socioeconómicos (Ramírez-Agudelo et al., 2021).

Comparación y crítica de estudios

Las tecnologías sostenibles para el tratamiento del agua están cambiando rápidamente, aunque se trata de un campo relativamente fragmentado con una diversidad de metodologías y resultados y diferentes contextos de aplicación (Chen et al., 2021; Colella et al., 2021). Los estudios experimentales y a escala piloto/de campo tienen sus respectivas fortalezas: los estudios de laboratorio tienen la ventaja de condiciones controladas para probar variables específicas, mientras que los ensayos piloto y a gran escala demuestran desafíos (por ejemplo, suciedad, escalabilidad, mantenimiento) en condiciones del mundo real (Chen et al., 2021; Colella et al., 2021). Las diferencias en los protocolos de monitoreo y las condiciones ambientales contribuyen a reducir la generalización de los hallazgos (Chen et al., 2021; Colella et al., 2021).

Las evaluaciones del ciclo de vida (LCA) y los análisis de costo-beneficio son útiles para comprender desempeño ambiental y capacidad económica, respectivamente. Los análisis del ciclo de vida (ACV) iluminan el consumo de energía, las emisiones de carbono emisiones y producción de desechos, mientras que los análisis de costo-beneficio informan la viabilidad económica (Adam et al., 2022; Ahmed et al., 2022).

Si bien estas metodologías son útiles, las disparidades metodológicas (por ejemplo, los diferentes límites del sistema o la falta de consideración de las externalidades) limitan comparabilidad entre estudios. En cambio, los enfoques multidisciplinarios que captan las dimensiones técnicas, económicas y sociales a menudo proporcionan resultados más significativos en el contexto. Pero las colaboraciones interdisciplinarias siguen estando poco explotadas (Adam et al., 2022; Ahmed et al., 2022).

Los sistemas de membrana retienen contaminantes, pero pueden verse obstaculizados por la suciedad y el consumo de energía asociado con el bombeo. Aunque se han utilizado métodos para degradar contaminantes basados en oxidación avanzada y nanotecnología, sus escalas de implementación y contaminantes objetivo varían considerablemente (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Las opciones de recuperación de recursos han demostrado tener potencial económico a través de la compensación de los costos operativos, pero los plazos para alcanzar el punto de equilibrio varían, dependiendo de las condiciones locales, como los precios de la energía y los incentivos de las políticas (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023). Las soluciones de baja tecnología son rentables al principio; sin embargo, no son tan robustos en condiciones cambiantes (Manikandan et al., 2022; Shehata et al., 2023).

Los contextos en los que se introducen estas tecnologías determinan su éxito o fracaso (Sikarwar et al., 2025). La gobernanza y el seguimiento frecuente, así como la aceptación pública, son factores clave para la adopción, mientras que la calidad de la infraestructura respalda la viabilidad junto con el clima (Sikarwar et al., 2025). Los sistemas energéticamente exigentes lo más probable es que se produzcan en zonas con redes eléctricas estables, mientras que los esfuerzos que demandan pocos recursos, probablemente se sitúen en regiones de recursos limitados (Sikarwar et al., 2025).

Las diferencias en la calidad del agua, las condiciones operativas y las estrategias de investigación conducen a hallazgos muy variables (Moradi, 2023; Rai, 2024), que pueden beneficiarse de métricas de desempeño estandarizadas para mejorar comparabilidad y confiabilidad. Las evaluaciones ofrecen información realista sobre variables del mundo real, como la bioincrustación y la aceptabilidad pública, pero requieren un mayor rigor metodológico para lograr una validez más amplia (Moradi, 2023; Rai, 2024). Es

necesario adaptar soluciones de otros entornos para entornos rurales o con recursos limitados, teniendo en cuenta elementos sociopolíticos como los impulsores de políticas y aceptación cultural antes de determinar la transferibilidad (Moradi, 2023; Rai, 2024).

En general, la literatura destaca las compensaciones entre la alta eficiencia de eliminación y los costos operativos, complejidad que ilustra simultáneamente los beneficios ambientales y económicos de nuevos enfoques de tratamiento como la recuperación de recursos (Romeiro, 2022; Sikarwar et al., 2025). Las influencias contextuales y las inconsistencias metodológicas resaltan la importancia de la colaboración interdisciplinaria y la implementación de métricas estandarizadas, así como diseños específicos para un determinado entorno (Romeiro, 2022; Sikarwar et al., 2025).

Estos esfuerzos no sólo fortalecerán la base de evidencia, sino que también dan forma al desarrollo de soluciones de tratamiento de agua sostenibles que puedan aplicarse a escala, sean rentables y “aptas para el propósito” en términos de desafíos globales locales (Romeiro, 2022; Sikarwar et al., 2025).

Conclusión

Esta revisión presenta los avances recientes en el tratamiento sostenible del agua con un enfoque en la interacción entre la innovación tecnológica, la competitividad económica y el impacto ambiental. Algunas de las técnicas líderes incluyen tecnologías de membrana avanzadas, adsorbentes basados en nanotecnología, recuperación de recursos (digestión anaeróbica y recuperación de nutrientes), etcétera.

Estas tecnologías son prometedoras para lograr una alta eliminación y control de contaminantes, pero están sujetos al contexto regional de regulación, infraestructura y financiamiento. Los más prometedores son los sistemas híbridos que combinan múltiples tecnologías de tratamiento, junto con la economía circular, enfoque basado en condiciones centralizadas, descentralizadas o con recursos limitados.

La revisión destaca importantes lagunas en la investigación existente ya que hay pocos estudios de campo sobre tecnologías emergentes, como tra-

tamientos basados en nanomateriales y membranas de próxima generación, especialmente en lo que respecta a durabilidad en el campo. Los proyectos piloto normalmente no incluyen métricas detalladas sobre escalabilidad, lo que significa que a menudo no están seguros de la energía necesaria, el mantenimiento que implica y si se adaptará bien a otras infraestructuras en proporciones mayores. Complicaciones metodológicas, como métricas inconsistentes y escasez de estudios comparativos en diversos contextos geográficos también complican el campo.

Los hallazgos resaltan la necesidad de una mayor interdisciplinariedad: colaboración con ingenieros, científicos y responsables de políticas, para abordar las posibles disparidades mediante protocolos de prueba estandarizados y diseños con información cultural. Las mejores evaluaciones del ciclo de vida (ECV) deberían incorporar parámetros sociales y económicos (aceptación pública, creación de empleo, por ejemplo), así como impactos ambientales y estudios orientados a políticas. Asimismo, se requieren pruebas de campo a largo plazo para evaluar las implicaciones regulatorias y la sostenibilidad operativa. Además, los modelos a nivel de sistemas y los marcos de implementación adaptativos pueden optimizar conjuntamente el despliegue de tecnología para tener en cuenta las compensaciones hidrológicas, socioeconómicas y ambientales.

Si se abordan estos desafíos, el sector de tratamiento del agua debería poder pasar de innovaciones experimentales a aplicaciones escalables en el mundo real que contribuirán a lograr soluciones efectivas, soluciones de seguridad hídrica ambientalmente sostenibles y socialmente equitativas.

Referencias

- Abdelfattah, I. y El-Shamy, A. M. (2024). Review on the escalating imperative of zero liquid discharge (ZLD) technology for sustainable water management and environmental resilience. *Journal of Environmental Management*, 351, 119614. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119614>
- Ahmad, A. L., Chin, J. Y., Harun, M. H. Z. M. y Low, S. C. (2022). Environmental impacts and imperative technologies towards sustainable treatment of aquaculture wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102553. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102553>

- Bijekar, S., Padariya, H. D. yadav, V. K., Gacem, A., Hasan, M. A., Awwad, N. S., ... y Jeon, B. H. (2022). The state of the art and emerging trends in the wastewater treatment in developing nations. *Water*, 14(16), 2537. <https://doi.org/10.3390/w14162537>
- Chaukura, N., Marais, S. S., Moyo, W., Mbali, N., Thakalekoala, L. C., Ingwani, T., ... y Nkambule, T. T. (2020). Contemporary issues on the occurrence and removal of disinfection byproducts in drinking water-a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103659. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103659>
- Dolan, F., Lamontagne, J., Link, R., Hejazi, M., Reed, P. y Edmonds, J. (2021). Evaluating the economic impact of water scarcity in a changing world. *Nature Communications*, 12(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22194-0>
- Egbemhenge, A. U., Ojeyemi, T., Iwuozor, K. O., Emenike, E. C., Ogunsanya, T. I., Anidiobi, S. U. y Adeniyi, A. G. (2023). Revolutionizing water treatment, conservation, and management: Harnessing the power of AI-driven ChatGPT solutions. *Environmental Challenges*, 13, 100782. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100782>
- Ehalt Macedo, H., Lehner, B., Nicell, J., Grill, G., Li, J., Limtong, A. y Shakya, R. (2022). Distribution and characteristics of wastewater treatment plants within the global river network. *Earth System Science Data*, 14(2), 559-577. <https://doi.org/10.5194/essd-14-559-2022>
- Fitton, N., Alexander, P., Arnell, N., Bajzelj, B., Calvin, K., Doelman, J., ... y Smith, P. (2019). The vulnerabilities of agricultural land and food production to future water scarcity. *Global Environmental Change*, 58, 101944. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.101944>
- Hamel, P. y Tan, L. (2022). Blue-green infrastructure for flood and water quality management in Southeast Asia: Evidence and knowledge gaps. *Environmental Management*, 69, 699-718. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01467-w>
- He, M., Xu, Z., Hou, D., Gao, B., Cao, X., Ok, Y. S., ... y Tsang, D. C. (2022). Waste-derived biochar for water pollution control and sustainable development. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(7), 444-460. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00306-8>
- Huang, Z. yuan, X. y Liu, X. (2021). The key drivers for the changes in global water scarcity: Water withdrawal versus water availability. *Journal of Hydrology*, 601, 126658. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126658>
- Jan, F., Min-Allah, N. y Düşteğör, D. (2021). IoT-based smart water quality monitoring: Recent techniques, trends, and challenges for domestic applications. *Water*, 13(13), 1729. <https://doi.org/10.3390/w13131729>
- Liu, Y., Zeng, X., Hu, X., Xia, Y. y Zhang, X. (2021). Solar-driven photocatalytic disinfection over 2D semiconductors: The generation and effects of reactive oxygen species. *Solar RRL*, 5(6), 2000594. <https://doi.org/10.1002/solr.202000594>
- Mao, G., Hu, H., Liu, X., Crittenden, J. y Huang, N. (2021). A bibliometric analysis of industrial wastewater treatments from 1998 to 2019. *Environmental Pollution*, 275, 115785. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115785>
- Mishra, P. y Singh, G. (2023). Energy management systems in sustainable smart cities based on the internet of energy: A technical review. *Energies*, 16(19), 6903. <https://doi.org/10.3390/en16196903>

- Muhammad, D. y Bendeche, M. (2024). Unveiling the black box: A systematic review of explainable artificial intelligence in medical image analysis. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 24, 542-560. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2024.08.005>
- Muscetta, M., Ganguly, P. y Clarizia, L. (2024). Solar-powered photocatalysis in water purification: Applications and commercialization challenges. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 113073. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113073>
- Nwokediegwu, Z. Q. S., Ugwuanyi, E. D., Dada, M. A., Majemite, M. T. y Obaigbena, A. (2024). Urban water management: A review of sustainable practices in the USA. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(2), 517-530. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i2.829>
- Obaideen, K., Shehata, N., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Mahmoud, M. S. y Olabi, A. G. (2022). The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDG) and sustainability guideline. *Energy Nexus*, 7, 100112. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112>
- Şahin, E., Arslan, N. N. y Özdemir, D. (2024). Unlocking the black box: An in-depth review on interpretability, explainability, and reliability in deep learning. *Neural Computing and Applications*, 37, 859-965. <https://doi.org/10.1007/s00521-024-10437-2>
- Selvakumar, P. (2025). Emerging trends in water treatment and purification techniques. En *Emerging trends and technologies in water management and conservation* (pp. 121-148). <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-6920-3.ch004>
- Singh, B. J., Chakraborty, A. y Sehgal, R. (2023). A systematic review of industrial wastewater management: Evaluating challenges and enablers. *Journal of Environmental Management*, 348, 119230. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119230>
- Shoshaa, R., Ashfaq, M. Y. y Al-Ghouti, M. A. (2023). Recent developments in ultrafiltration membrane technology for the removal of potentially toxic elements and enhanced antifouling performance: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103162. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103162>
- Zhang, X., Wang, G., Xue, B., Zhang, M. y Tan, Z. (2021). Dynamic landscapes and the driving forces in the Yellow River Delta wetland region in the past four decades. *Science of the Total Environment*, 787, 147644. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147644>

3. Transición sustentable en el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México*



CHRISTIAN MUÑOZ SÁNCHEZ**

DULCE MARÍA MONROY BECERRIL***

MARÍA CONCEPCIÓN MARTÍNEZ RODRÍGUEZ****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.03>

Resumen

El transporte aéreo se enfrenta actualmente en la búsqueda de convertirse en un transporte sustentable a largo plazo, ya que todavía mantiene una fuerte dependencia de combustibles fósiles con grandes emisiones contaminantes al medio ambiente. La situación actual presenta desafíos y cambios complejos con relación a la sustentabilidad. Estos cambios en beneficio del medio ambiente son llamados *transiciones sustentables* (ts). La idea central es que las ts implican cambios a largo plazo hacia modos de producción y consumo más sustentables en múltiples dimensiones (social, ambiental y económica). Por lo tanto, el propósito del presente capítulo es analizar la transición sustentable en el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México. A través del desarrollo de la metodología de estudio

* Capítulo derivado del proyecto de investigación SIP 20254342: "Sistemas de innovación y transiciones sustentables para el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México", patrocinado por el Instituto Politécnico Nacional, México.

** Doctor en Ciencias Sociales. Profesor-investigador del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8692-4252> ; correo electrónico: cmunozs@ipn.mx

*** Doctora en Administración Pública. Profesora-investigadora del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0787-5577>

**** Doctora en Política Pública. Profesora del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>

de caso y análisis funcional revelaron debilidades dentro de las funciones evaluadas para la adecuada transición sustentable.

Palabras claves: *transiciones sustentables, sustentabilidad, industria aeronáutica, producción y consumo sustentable.*

Introducción

Las transiciones sustentables (TS) tienen como característica central solucionar problemas persistentes con el medio ambiente; las empresas tienen incentivos limitados para abordarlas, porque el objetivo está relacionado con un beneficio económico principalmente, la parte gubernamental, instituciones educativas y organizaciones intermedias juegan un papel clave para llevar a cabo las TS y apoyar las tecnologías pro sustentables (Elzen et al., 2004; Geels, 2024).

Otra característica central se relaciona con los sectores estratégicos para evaluar TS, por ejemplo, el sector transporte, agua, energía y agroindustria. Estos sectores estratégicos se caracterizan por ser abordados por grandes empresas (por ejemplo, compañías petroleras, fabricantes de aeronaves y automóviles, empresas de procesamiento de alimentos, empresas de comercio electrónico, supermercados, cadenas de comida rápida, entre otros) que poseen “activos complementarios” como la capacidad de fabricación especializada, alta investigación en I+D, producción a gran escala, acceso a canales de distribución, redes de servicio y tecnologías complementarias (Geels, 2024).

Sin embargo, la literatura académica y enfoques teóricos emergentes que exploran el análisis de las transiciones sustentables aún permanece en sus primeras etapas; por lo tanto, el presente capítulo tiene como objetivo analizar la transición sustentable en el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México.

Seguido de la presente introducción, el documento se divide en cuatro secciones: la segunda se enfoca en una revisión teórico-conceptual sobre transiciones sustentables; en la tercera sección, se esboza el diseño metodológico; en la cuarta sección se discuten los principales hallazgos del análisis

funcional de la transición sustentable en el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México; finalmente, se presentan las conclusiones de la investigación y bibliografía.

Desarrollo

Transiciones sustentables

La idea central es que las TS implican cambios a largo plazo hacia modos de producción y consumo más sustentables en múltiples dimensiones (social, ambiental y económica). Las TS no sólo implican el desarrollo de innovaciones en productos, procesos y servicios más sustentables, sino también, nuevos mercados, modelos de negocio, prácticas, políticas, infraestructuras y cambios culturales; es decir, las transiciones además de sostener el crecimiento económico también ayuden a proteger el medio ambiente (Geels, 2004, 2024).

Cabe aclarar que el enfoque de TS ha sido investigado recientemente en países desarrollados, principalmente en Europa (Alemania, Reino Unido, Holanda, Francia, Dinamarca, Suiza, Finlandia) (Raven, 2007; Geels, 2024; Truffer et al., 2017), pero para el caso de los países emergentes como México, no se ha identificado este tipo de investigaciones, por lo que es importante avanzar en el conocimiento de la forma en que se generan TS en países emergentes y México, con la complejidad y características que implica el análisis de los SI en estas economías; se hace especial hincapié en comprender y mejorar las estrategias para acelerar la transición hacia energías sustentables, en particular las energías para el transporte aéreo.

La evidencia empírica se centra en el caso de TS hacia energías limpias en el transporte aéreo. El sector aéreo se enfrenta actualmente a grandes desafíos económicos, sociales, ambientales, tecnológicos, entre otros; para abordar tales desafíos el sector se encuentra en la búsqueda de oportunidades para reducir los costos operativos, ganar eficiencia energética y convertirse en un sector sostenible a largo plazo. Se ha argumentado que las actividades derivadas del transporte son la segunda fuente principal de emisiones de CO₂, justo después del sector industrial. El consumo de com-

bustible para aeronaves, por ejemplo, se duplicará entre 2020 y 2040 debido al aumento mundial de los viajes aéreos (IATA, 2023). En este sentido, la industria aeronáutica enfrenta importantes desafíos en sus intentos de mejorar la eficiencia energética, disminuir su dependencia de los fósiles combustibles y reducir sus costos.

Se prevé que el consumo de combustibles para aviones en los países de la OCDE, incluido México, aumente en los próximos años, más del doble para 2040, pasando de 5 billones de BTU en 2015 a 12 billones de BTU (British Thermal Unit). El aumento global también se encuentra fuertemente impulsado por el aumento del consumo en combustibles para aeronaves de China e India. De hecho, el crecimiento de la población en todo el mundo, la necesidad de transporte personal, el desarrollo económico y empresarial son algunos de los principales factores que motivan el consumo de combustible para el transporte aéreo en las próximas décadas (IATA, 2023).

El desarrollo de biocombustibles para aviones ha sido identificado por la Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA, por sus siglas en inglés) como la estrategia con mayores ventajas para reducir emisiones de CO₂ en la industria aeronáutica. En este contexto la IATA tiene como objetivo reducir en un 50% las emisiones de carbono que genera la industria en relación con el año base de 2005 (IATA, 2023).

El combustible para aviones convencional (con recursos fósiles) está compuesto por aproximadamente un 20% de parafinas, un 40% de isoparafinas, un 20% de naftenos y un 20% de aromáticos. Esta combinación da al combustible fósil sus propiedades físicas, cuando se quema combustible para aviones, se forman otras emisiones, incluidos óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos no quemados (IATA, 2023). Los biocombustibles para aviones pueden proporcionar una solución a corto plazo e incluso a largo plazo para el sector aéreo en forma de un impacto medio ambiental menor que los combustibles fósiles para el sector.

Metodología

Diversos estudios señalan la importancia del estudio de caso como uno de los métodos de investigación cualitativa más usados en las ciencias sociales (Bryman, 2012; Corbin y Strauss, 2015).

Yin (2022) es uno de los principales autores que abordan el método de estudio de caso. Establece que es un método de investigación que estudia un fenómeno contemporáneo en el contexto de la vida real, en especial cuando los límites entre el fenómeno y su contexto no son claramente evidentes.

Yin (2022) indica que una de las principales críticas asociadas a los estudios de caso es que sus conclusiones no son generalizables estadísticamente, sin embargo, los estudios de caso no representan una muestra de un universo concreto, por lo que no se generalizan estadísticamente, sino a proposiciones teóricas, ya que el objetivo del investigador es hacer generalizaciones analíticas y no generalizaciones estadísticas, es así como el propósito del estudio de caso es comprender la interacción entre las distintas partes de un sistema y de las características importantes de éste, de forma que el análisis realizado pueda ser aplicado de manera genérica. Al seleccionar el estudio de caso como método de investigación, se pueden lograr diferentes objetivos: realizar descripciones, hacer explicaciones o interpretaciones, explorar características y hacer evaluaciones sobre el fenómeno que se investiga (Bryman, 2012; Yin, 2022).

La presente investigación consideró el análisis funcional como las variables en estudio que permiten mostrar la transición sustentable evaluada en el presente capítulo.

El análisis a través de funciones enfatiza la importancia de la dinámica de los SI en comparación con cómo está compuesto o estructurado (Jacobsen y Bergek, 2011). Esta orientación se relaciona completamente con las transiciones sustentables en términos de la evolución de una tecnología sustentable emergente como es el caso de biocombustibles en México para la presente investigación. La tabla 3.1 muestra las variables y su definición conceptual para el estudio de caso de la transición sustentable de biocombustibles para la industria aeronáutica en México.

Tabla 3.1. *Representación de las variables y su definición conceptual para la transición sustentable de biocombustibles para la industria aeronáutica en México*

<i>Variables</i>		<i>Definición conceptual</i>
F1	Actividades de emprendimiento	Las actividades empresariales involucran proyectos destinados a demostrar la utilidad de la tecnología emergente en un entorno práctico y/o comercial (Hekkert y Negro, 2009; Geels, 2024).
F2	Desarrollo del conocimiento	Incorpora actividades de aprendizaje, principalmente en la tecnología emergente, en el contexto del desarrollo del SI, esto significa que una intensidad creciente del desarrollo del conocimiento implica un número creciente de opciones disponibles dentro del sistema, en términos de tecnología y también en términos de sus posibles aplicaciones (Hekkert y Negro, 2009).
F3	Difusión del conocimiento	Para que un SI prospere es importante que se produzca la difusión del conocimiento entre agentes del SI. Una forma de aprendizaje interactivo es mediante el uso de tecnologías que implica funciones de aprendizaje basado en las experiencias de los usuarios sobre innovaciones (Hekkert y Negro, 2009; Geels, 2024).
F4	Orientación de la investigación	Hace referencia a la convergencia de señales positivas y negativas —expectativas, promesas, directivas de política— en una dirección particular del desarrollo de una tecnología emergente (Hekkert y Negro, 2009).
F5	Formación de mercado	Hace referencia a la existencia de un mercado potencial para el desarrollo de la tecnología sustentable emergente, e involucra actividades que contribuyen a la creación de dicho mercado (Hekkert y Negro, 2009; Canitez, 2019).
F6	Movilización de recursos	Se refiere a la asignación de capital financiero, material y humano. El acceso a tales factores de capital es necesario para el desarrollo del SI. Las actividades típicas involucradas en esta función del sistema son las inversiones y subsidios (Canitez, 2019; Hekkert y Negro, 2009; Geels, 2024).
F7	Creación de legitimidad	Involucra lobbies políticos y actividades de asesoramiento en nombre de grupos de interés para desarrollar determinada tecnología emergente. La característica principal que distingue esta función es que las coaliciones de defensa buscan legitimidad en una tecnología emergente a través de lobbies y persuasión frente a otros grupos de interés (Canitez, 2019; Hekkert y Negro, 2009; Geels, 2024).
F8	Crecimiento económico	El crecimiento económico es una función que influye en el desarrollo o freno de una tecnología emergente dentro del SI, si bien un mayor crecimiento económico contribuye a más ingresos de un país, una disminución debido a eventos nacionales y/o internacionales también puede propiciar TS (Geels, 2002, 2024).
F9	Política regulatoria	Las políticas regulatorias impulsan el desarrollo de TS en tecnologías emergentes, pero también pueden inhibir su desarrollo, las políticas regulatorias pueden aplicarse a nivel internacional y nacional (Canitez, 2019; Geels, 2024).

Fuente: elaboración propia.

A continuación, en la tabla 3.2 se presentan las variables y su correspondiente indicador, una revisión sistemática de fuentes secundarias (reportes,

bases de datos, documentos oficiales y social media), a través de la herramienta tecnológica Verisk Analytics®.

Tabla 3.2. *Operacionalización de variables para el análisis de la transición sustentable de biocombustibles para la industria aeronáutica en México*

<i>Variables</i>		<i>Indicador</i>
F1	Actividades de emprendimiento	Proyectos iniciados y planificados, experimentaciones y actividades de emprendimiento, desarrollo de la cadena de valor de los agentes relacionados con el desarrollo de los biocombustibles en México.
F2	Desarrollo del conocimiento	Proyectos de investigación básica y aplicada en curso, patentes y publicaciones relacionadas con los biocombustibles en México.
F3	Difusión del conocimiento	Número de eventos, congresos y otros foros, análisis de social media relacionada con los biocombustibles en México.
F4	Orientación de la investigación	Expectativas establecidas por los agentes clave del sistema de innovación de biocombustibles en México en términos del desarrollo de la nueva tecnología.
F5	Formación de mercado	Existencia de un mercado potencial para el desarrollo de la nueva tecnología de biocombustibles en México.
F6	Movilización de recursos	Inversión en recursos y políticas para el desarrollo de biocombustibles (recursos humanos, técnicos y financieros).
F7	Creación de legitimidad	Cabildeo político establecido por grupos de influencia para el desarrollo de biocombustibles en México.
F8	Crecimiento económico	Indicadores clave del crecimiento económico en México.
F9	Política regulatoria	Creación de políticas regulatorias que afectan el desarrollo de biocombustibles en México.

Fuente: elaboración propia.

Análisis y resultados

Función 1: Actividades de emprendimiento

De acuerdo con Lovio et al. (2012),

el combustible para motores de aviación de reacción o propulsión a chorro (queroseno o *jet fuel*) se obtiene comúnmente del proceso de refinación del petróleo crudo. La materia prima para su producción corresponde a la segunda fracción (punto de ebullición 205-260 °C) que se produce

de la torre de destilación, la cual se trata con hidrógeno para convertirla en queroseno. (p. 781)

La IATA (2023) señala que “los combustibles alternativos para motores de aviación de reacción o propulsión a chorro se pueden obtener de una variedad de fuentes como el carbón, arenas o esquistos bituminosos, plantas y grasas animales”. Sin embargo, el propósito de producir biocombustibles es contar con combustibles alternativos sustentables que tengan las mismas propiedades que la turbosina para su uso en motores de aeronaves con el fin de reducir las emisiones y la dependencia de los combustibles fósiles (IATA, 2023).

Los cinco componentes clave de la cadena de valor de biocombustibles son los siguientes:

- Sistema de producción de biomasa
- Sistema logístico de biomasa
- Sistema de producción de biocombustible
- Sistema de distribución del biocombustible
- Uso final del biocombustible

Algunas de las principales actividades de emprendimiento para el desarrollo de biocombustibles en México ha sido el cultivo de materias primas para su posterior procesamiento y fabricación como son el aceite de jatropha, el aceite de girasol, el aceite de canola y el aceite de palma.

Existen más de 6 millones de hectáreas de plantaciones de *Jatropha* con potencial para el establecimiento de aproximadamente 2.6 millones de hectáreas (SIAP, 2024). Los estados del país que tienen las mejores condiciones para el cultivo de estos arbustos son Sinaloa, Tamaulipas, Guerrero, Chiapas y Michoacán; una de las principales ventajas es que *Jatropha* puede crecer en condiciones semiáridas o en suelos arenosos con un bajo contenido de nutrientes y casi no necesita suministros adicionales ni regímenes nutricionales especiales.

Función 2: Desarrollo del conocimiento

Para el año 2015, un grupo de organizaciones que colaboran con ASA en el Plan de Vuelo, se agruparon en el clúster de bioturbosina del CEMIE-Bio, iniciativa apoyada por la Sener a través del Fondo Sectorial Conacyt-Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética, el clúster consorcio de agentes clave del SI de biocombustibles creado para la consolidación de capacidades científico-tecnológico-empresariales, formación de recursos humanos, vinculación y expansión de los biocombustibles en México.

Las acciones realizadas por ASA se conforman en las siguientes fases (ASA, 2024):

- *Primera fase:* se analizó la viabilidad del desarrollo de biocombustibles en México a través del diagnóstico de la cadena de valor y de la producción de un inventario significativo de bioturbosina para llevar a cabo el primer vuelo de demostración en el país.
- *Segunda fase:* la segunda fase incluye el uso de biocombustibles en vuelos comerciales. Durante 2010 y 2011, ASA en colaboración con The Boeing Company realizó el proyecto “Plan de vuelo hacia los biocombustibles sustentables de aviación en México”, iniciativa que logró la integración y el diagnóstico de la cadena de valor de biocombustibles en México (ASA, 2024).

ASA inició un primer ejercicio de producción de biocombustibles, involucrándose a lo largo de toda la cadena de producción, obteniendo semilla proveniente de productores, sometiéndola al proceso de extracción a través de terceros, todo esto logrando generar más de 40 mil litros de biocombustibles (ASA, 2024).

El plan de vuelo se extendió a dos estados del país clave en la producción de materias primas para biocombustibles como son el estado de Hidalgo y Morelos. ASA seleccionó el estado de Hidalgo por la cercanía al Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), la refinería de Tula, las áreas potenciales para la instalación de biorefinería, la planta de tratamiento de aguas de Atotonilco, las áreas potenciales de cultivo, los parques industria-

les y la infraestructura carretera. Dentro de las acciones relevantes de este proyecto, se establece (ASA, 2024):

- Realizar estudios y pruebas ingenieriles para obtener el plan de ejecución definitivo de producción de biocombustibles.
- Realizar actividades de desarrollo de infraestructura y adquisición de activos para establecer la cadena de producción y abastecer en un futuro el centro del país, conservando los criterios de sustentabilidad e iniciar producción de biocombustibles en 2025.

Función 3: Difusión del conocimiento

El primero de abril de 2011, como resultado del aprendizaje del plan de vuelo, se realizó el primer vuelo de demostración con un avión comercial. La aeronave Airbus A320 de la aerolínea Interjet, despegó del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) con destino al Aeropuerto Internacional Ángel Albino Corzo de la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, en Chiapas, este vuelo fue el séptimo a nivel mundial en su categoría y el segundo en Latinoamérica (ASA, 2024).

ASA suministró 4 500 litros de biocombustibles que se utilizaron, por instrucciones del fabricante, solamente en uno de los motores. La materia prima, semilla *jatropha curcas*. La composición de biocombustibles fue 27% y 73% de combustible de origen fósil (ASA, 2024).

El 21 de julio de 2011 se realizaron los primeros vuelos comerciales por la aerolínea Interjet con la ruta Ciudad de México-Tuxtla Gutiérrez-Ciudad de México; la aerolínea consumió alrededor de 7 500 litros de biocombustibles (ASA, 2024).

El 3 de octubre de 2011, a través de una aeronave Airbus 340/600 de la línea aérea Iberia, se realizó un vuelo comercial de la ruta Madrid-Barcelona impulsado con biocombustibles proporcionada por ASA, el vuelo formó parte de la iniciativa española denominada Vuelo Verde, proyecto piloto desarrollado por Iberia y Repsol, el país participó como proveedor del bioenergético, mediante la venta de 10 mil litros de biocombustibles a la compañía petrolera española Repsol (ASA, 2024).

Entre septiembre de 2011 y abril de 2012 Aeroméxico dio inicio al programa de Vuelos Verdes, donde ASA participa como proveedor de biocombustibles utilizada, en este periodo se llevaron a cabo 29 vuelos donde se suministraron un volumen total de 35 825 litros para la ejecución del programa, el vuelo itinerario fue la ruta México-San José de Costa Rica, con el 25% de combustible alternativo (ASA, 2024).

Función 4: Orientación de la investigación

En el año 2015, derivado de la experiencia y aprendizaje del Plan de Vuelo liderado por ASA, se creó una iniciativa apoyada por Sener a través del Fondo Sectorial Conacyt-Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética, para crear el Clúster de biocombustibles del CEMIE-Bio. El clúster inició operaciones en 2016 y es un proyecto con una duración de cuatro años que busca avanzar en la implementación y desarrollo de biocombustibles en México.

El clúster es un consorcio con dependencia del gobierno, centros de investigación y empresas (agentes del SI) creado para consolidar las capacidades científico-tecnológicas-empresariales, vinculación y desarrollo de biocombustibles en México. El clúster de bioturbosina es liderado por el IPICYT, las principales líneas de investigación que se desarrollan en el clúster son (CEMIE-Bio, 2016):

- Producción y transformación de biomasa
- Sustentabilidad y Análisis del Ciclo de Vida (ACV)
- Transformación de biocombustibles
- Implementación del mercado de biocombustibles

Función 5: Formación de mercado

La industria aeronáutica ha motivado el desarrollo de otros sectores, incluidos el turismo, logística y carga, telecomunicaciones, electrónica e informática, materiales avanzados, biocombustibles, bienes de capital, suministros

de defensa, salvamento y seguridad pública. La producción de aeronaves ha aumentado entre 2004-2005. La figura 66 muestra la orden de venta y el historial de producción de aviones comerciales desde 1981 hasta 2016, periodo durante el cual hubo un aumento del 220% (IATA, 2023).

Utilizando un promedio móvil de siete años, los niveles de producción durante los últimos 20 años han aumentado un 120.5% desde 1996. Durante la próxima década, se prevé que los niveles de producción anual de aviones comerciales aumenten en un 29.3% . Estas cifras son congruentes y están correlacionadas con las cifras de consumo de combustible para aviones proporcionadas por la IATA. En otras palabras, toda la industria y todos los proveedores de la cadena de suministro crecieron significativamente en las últimas dos décadas y se espera que sigan creciendo durante al menos otras dos (IATA, 2023).

Se considera que América Latina tiene buenas perspectivas de desarrollo de la industria aeronáutica. La industria está liderada por Brasil, México, Panamá, Chile, Colombia y Perú, que han mostrado un buen desempeño en los indicadores económicos y se están expandiendo, generando nuevas rutas, aumentando la demanda de aeronaves e impulsando los mercados internos. Se proyecta que la flota comercial de la región se duplique entre 2015 y 2035, de casi 1 550 aviones a más de 3 600 (IATA, 2023).

Además, la región se considera estratégica para el desarrollo de la industria aeronáutica debido a las inversiones en la industria, la creciente demanda y los desarrollos en infraestructura, que incluyen nuevos aeropuertos y adquisición de aeronaves en toda la región. Con relación al mercado interno, en 2018 los pasajeros transportados por vía aérea marcaron un máximo histórico al llegar a 97.3 millones de pasajeros, lo anterior representa un incremento del 7.6% con respecto a 2017, donde se transportaron 90.5 millones de pasajeros (SCT, 2018).

Función 6: Movilización de recursos

En 2012 se creó el Fondo Sectorial Conacyt-Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética durante la administración 2012-2018, de acuerdo a la Sener (2018) el propósito del Fondo “es el financiamiento de investigaciones

científicas, desarrollo tecnológico, innovación, el registro nacional o internacional de propiedad intelectual, formación de recursos humanos especializados, becas, creación, fortalecimiento de grupos o cuerpos académicos o profesionales de investigación, desarrollo tecnológico e innovación”.

El 20 de diciembre de 2013 se promulgó la reforma constitucional en materia energética, que modifica los artículos 25, 27 y 28 de la Constitución Política, y permitió dar un giro positivo al sector mexicano de energía; entre sus principales objetivos encontramos (Sener, 2018):

- Modernizar y fortalecer a Petróleos Mexicanos (Pemex) y a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), como empresas productivas del Estado.
- Reducir la exposición del país a los riesgos financieros, geológicos y ambientales en las actividades de exploración y extracción de petróleo y gas natural.

En 2014, se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley Federal de Presupuesto y Responsabilidad Hacendaria (LFPRH) y de la Ley General de Deuda Pública. Con esta reforma, los artículos 88 y 89 de la LFPRH constituyen el actual fundamento jurídico del Fondo Sectorial Conacyt-Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética, el fondo de mayor financiamiento a energías renovables, donde se logró el financiamiento por parte del Estado para el desarrollo de biocombustibles en México (DOF, 2014).

Dentro de los proyectos más importantes financiados por el Fondo se encuentran los centros mexicanos de innovación en energía (CEMIE) que contribuyen al desarrollo del sector energético para ayudar a que, en el futuro, México cuente con un mayor número de fuentes de energía. Cada uno de estos centros (bio, eólico, geotérmico, océano y solar) han desarrollado una planeación científico-tecnológica de mediano y largo plazo y cuentan con diversas líneas estratégicas de investigación. Operan de forma autónoma y sin un espacio físico, toda vez que están integrados por más de 120 instituciones, centros de investigación, empresas y entidades gubernamentales y expertos en distintas ramas de las energías renovables, coordinados

cada uno por un grupo directivo propio y diversos comités de evaluación, monitoreo y seguimiento (Sener, 2018).

Para el caso de los biocombustibles destaca el Clúster de Bioturbosina del CEMIE-Bio un proyecto que inició operaciones en 2016 con una duración de cuatro años, al Fondo se le asignó un presupuesto aproximado de 380 millones de pesos.

Función 7: Creación de legitimidad

Como se mencionó en la Función 6 (Movilización de recursos), en 2012 se creó el Fondo Sectorial Conacyt-Secretaría de Energía-Sustentabilidad Energética durante la administración de gobierno (2012-2018). El Fondo apoya el desarrollo de energías sustentables, dentro de la cuales se encuentra el desarrollo de biocombustibles en México con proyectos financiados con fondos públicos (Sener, 2018).

Dentro de los proyectos más importantes financiados por el Fondo se encuentran los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIE) que contribuyen al desarrollo del sector energético para ayudar a que, en el futuro, México cuente con un mayor número de fuentes de energía. Derivado de los CEMIE, se crea el Clúster de Bioturbosina del CEMIE-Bio un proyecto que inició operaciones en 2016 con una duración de cuatro años, al Fondo se le asignó un presupuesto aproximado de 380 millones de pesos (Sener, 2018).

El Plan Nacional de Desarrollo (PND) es el documento de planeación clave para establecer las prioridades nacionales en materia de política pública. El PND 2019-2024 tiene como objetivo general “Transformar la vida pública del país para lograr un mayor bienestar para todos”. El PND (2019) tiene tres ejes rectores:

- *Justicia y estado de derecho*: políticas para garantizar la construcción de la paz, el pleno ejercicio de los derechos humanos, la gobernanza democrática y el fortalecimiento de las instituciones políticas de México.

- *Bienestar*: políticas para garantizar el ejercicio efectivo de los derechos económicos, sociales, culturales y ambientales, con énfasis en la reducción de la desigualdad y las condiciones de vulnerabilidad de las poblaciones y territorios.
- *Desarrollo económico*: políticas dirigidas a aumentar la productividad y promover un uso eficiente y responsable de los recursos para contribuir a un crecimiento económico equilibrado que garantice un desarrollo equitativo, incluyente y sostenible en todo el territorio.

Función 8: Crecimiento económico

De acuerdo con el estudio de la OCDE (2019),

la riqueza petrolera, el crecimiento de la población en edad productiva, el libre comercio y las políticas de inversión han sustentado el crecimiento moderado de las últimas dos décadas [...]. La producción de petróleo ha ido en descenso: en la última década bajó de 9% a 4% del PIB y de 16% a 6% del total de exportaciones. (p. 19)

Respecto al Reporte de Competitividad Global 2021 desarrollado por el Foro Económico Mundial (WEF, por sus siglas en inglés), éste menciona que las tensiones comerciales e incertidumbre derivadas de la política comercial internacional de Estados Unidos constituyen un viento en contra que impiden el desarrollo socioeconómico de México, reduciendo las expectativas de los líderes empresariales y, en consecuencia, su disposición a invertir. Con relación a los indicadores clave, en términos de habilidades, el nivel educativo aún es bajo (8.6 años en promedio, lugar 84 del Reporte) y los planes de estudio no están actualizados (habilidades digitales, lugar 99 y pensamiento crítico, lugar 103). Asimismo, las mejoras en las instituciones se han concentrado en la eficiencia administrativa del sector público (+4.5 puntos respecto al reporte de 2018, lugar 59), mientras que la seguridad (lugar 138) y la transparencia (lugar 116) siguen siendo problemáticos; además hay algunas áreas donde el desempeño disminuye, la inflación, por ejemplo, ha aumentado (5.5%, lugar 111), la esperanza de vida saludable se

ha reducido en 0.9 años (lugar 60) y la falta de mejoras en la infraestructura de transporte (lugar 51) requiere más esfuerzos para acercar la competitividad de México a las economías mejor clasificadas (WEF, 2021).

Función 9: Política regulatoria

El Gobierno de México decretó en febrero del año 2008, la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos (DOF, 2008).

En el marco de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB), Capítulo II, artículo 8, se crea la Comisión Intersecretarial de Bioenergéticos, integrada por los titulares de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa), Secretaría de Energía (Sener), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), la Secretaría de Economía (SE) y la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP).

En el mes de diciembre de 2015, se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la Ley de Transición Energética (LTE) con la que se definen las bases legales para impulsar una transformación hacia un modelo energético y económico sustentable en el largo plazo (DOF, 2015).

Por su parte, de acuerdo con información emitida por el DOF (2015),

la Ley de Transición Energética (LTE) tiene por objeto regular el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de energías limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos. (p. 1)

El Consejo Consultivo para la Transición Energética, en su sesión celebrada el 27 de noviembre de 2019, emitió diversas opiniones y recomendaciones con objeto de coadyuvar en la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, mismas que fueron tomadas en consideración por la Secretaría de Energía. La Sener aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en tér-

minos de la Ley de Transición Energética. El presente Acuerdo entró en vigor el 17 de enero de 2020, el día de su publicación en el DOF (2019).

Conclusiones

El análisis funcional, permite mapear la transición sustentable de biocombustibles para la industria aeronáutica en México para el monitoreo iterativo de los eventos clave extraídos principalmente de informes, documentos oficiales, bases de datos y social media, para ello se utilizó la herramienta tecnológica Verisk Analytics®.

Las lecciones empíricas derivadas de la transición sustentable de biocombustibles para la industria aeronáutica en México revelaron debilidades dentro de las funciones evaluadas para la adecuada transición sustentable. Se deben fomentar cada una de las funciones clave con proyectos a largo plazo con la colaboración y consenso de los agentes clave del sistema de innovación de biocombustibles en el país, la política pública juega un papel fundamental para el desarrollo y consolidación de la transición sustentable, sin embargo, actualmente no existen políticas públicas, ni incentivos para el desarrollo de biocombustibles para la industria aeronáutica en México.

Referencias

- Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA). (2024, 10 de noviembre). *Biocombustibles sustentables de aviación en México*. http://bioturbosina.asa.gob.mx/es_mx/BIOturbosina/Plan_de_Vuelo_Nacional
- Bruno, M. (2022). Cycling and transitions theories: A conceptual framework to assess the relationship between cycling innovations and sustainability goals. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 15, 100642. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100642>
- Bryman, A. (2012). *Social research methods* (4ª ed.). Oxford University.
- Canitez, P. (2019). A socio-technical transition framework for introducing cycling in developing megacities: The case of Istanbul. *Cities*, 94, 172-185. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.06.006>
- CEMIE-Bio. (2016). *Clúster Bioturbosina: Anexo III: Plan General del Clúster Bioturbosina*.

- Corbin, J. y Strauss, A. (2015). *Basics of qualitative research: Techniques and procedures for developing grounded theory* (4ª ed.). Thousand Oaks.
- Diario Oficial de la Federación. (2008a). *Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética*.
- Diario Oficial de la Federación. (2008b). *Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos*.
- Diario Oficial de la Federación. (2015). *Ley de Transición Energética*.
- Diario Oficial de la Federación. (2016). *Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios*.
- Diario Oficial de la Federación. (2019). *Plan Nacional de Desarrollo 2019-2020*.
- Elzen, B., Geels, F. W. y Green, K. (2004). *System innovation and sustainability transitions: Theory, evidence and policy*. Edward Elgar.
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31, 1257-74. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8)
- Geels, F. W. (2004). From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. *Research Policy* 33 (6-7), 897-920. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2004.01.015>
- Geels, F. W. (2005). Co-evolution of technology and society: The transition in water supply and personal hygiene in the Netherlands (1850-1930): A case study in multi-level perspective. *Technology in Society*, 27(3), 363-397. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2005.04.008>
- Geels, F. W. (2014). Regime resistance against low-carbon transitions: Introducing politics and power into the multi-level perspective. *Theory Culture & Society*, 31(5), 21-40. <https://doi.org/10.1177/0263276414531627>
- Geels, F. W. (2024). *Advanced introduction to sustainability transitions*. Edward Elgar.
- Geels, F. W. y Schot, J. W. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy*, 36(3), 399-417. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>
- Hekkert, M. y Negro, S. (2009). Functions of innovation systems as a framework to understand sustainable technological change: Empirical evidence for earlier claims. *Technological Forecasting and Social Change*, 76, 584-594.
- International Air Transport Association (IATA). (2025, 5 de abril). *Annual Review 2023*. <https://www.iata.org/contentassets/c81222d96c9a4e0bb4ff6ced0126f0bb/annual-review-2023.pdf>
- Jacobsson, S. y Bergek, A. (2011). Innovation system analyses and sustainability transitions: Contributions and suggestions for research. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 41-57.
- Lovio, R. y Kivimaa, P. (2012). Comparing alternative path creation frameworks in the context of emerging biofuel fields in the Netherlands, Sweden and Finland. *European Planning Studies*, 20(5), 773-790.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (2019, mayo). *Estudios económicos de la OCDE: México 2019* [Reporte]. <https://doi.org/10.1787/fde7bbbe-es>

- Raven, R. (2007). Co-evolution of waste and electricity regimes: Multi-regime dynamics in the Netherlands (1969-2003). *Energy Policy*, 35(4), 2197-2208.
- Secretaría de Energía (Sener). (2024, 9 de abril). *Prospectiva de energías renovables 2016-2030*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/177622/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2016-2030.pdf
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024, 3 de octubre). Gobierno de México.
- Truffer, B., Schippl, J y Fleischer, T. (2017). Decentering technology in technology assessment: Prospects for socio-technical transitions in electric mobility in Germany. *Technological Forecasting and Social Change*, 122(1), 34-48.
- World Economic Forum (WEF). (2021). *The global competitiveness report 2021*.
- Yin, R. (2022). *Case study research: Design and methods* (2ª ed.). Sage.

4. Producción limpia en la política industrial verde: Entre la sostenibilidad y la transformación del modelo productivo



RODRIGO FLORÊNCIO DA SILVA*

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.04>

Resumen

La emergencia climática, la presión sobre los recursos naturales y las exigencias de competitividad en mercados globales están forzando una revisión de los modelos productivos tradicionales. En este contexto, conceptos como “industria verde” y “sustentabilidad” suelen utilizarse como sinónimos, aunque presentan diferencias fundamentales. Mientras la industria verde se orienta a la reconversión tecnológica, la innovación y la reducción del impacto ambiental en los procesos, la sustentabilidad implica una transformación estructural más amplia, que integra dimensiones sociales, culturales, económicas y ecológicas. Este capítulo analiza la tensión y la complementariedad entre ambos conceptos, proponiendo la producción limpia como puente práctico y estratégico.

La producción limpia, entendida como un enfoque preventivo de gestión ambiental aplicado a procesos, productos y servicios, busca maximizar la eficiencia de recursos y minimizar residuos y emisiones. En México, su adopción ha sido fragmentada, aunque existen casos exitosos que demuestran su viabilidad y beneficios económicos y ambientales. Desde esta perspectiva, se plantea que la producción limpia puede ser una herramienta

* Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo. Profesor-investigador del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9644-7645> ; correo electrónico: rflorenco@ipn.mx

concreta para el diseño e implementación de políticas industriales verdes, superando barreras estructurales y promoviendo prácticas sostenibles.

Este capítulo examina el rol de la producción limpia en la construcción de una política industrial verde en México, evaluando su capacidad para alinear intereses económicos con la agenda de sostenibilidad. La metodología se basa en revisión de literatura científica y técnica (PNUMA, OCDE, CEPAL) y análisis de casos exitosos de empresas mexicanas. Se consideran criterios como impacto ambiental, eficiencia energética, uso responsable del agua, innovación tecnológica y articulación regulatoria. Como resultados, se identifican patrones comunes, limitaciones para su escalamiento y propuestas de política pública que posicionen la producción limpia como pilar de una industria verde, inclusiva y resiliente.

Palabras clave: *producción limpia, industria verde, sustentabilidad, política industrial, innovación ambiental.*

Introducción

La aceleración de la crisis climática, la creciente presión sobre los recursos naturales y las nuevas dinámicas de competitividad global han puesto en tela de juicio la viabilidad de los modelos productivos tradicionales. Frente a este escenario, conceptos como “industria verde” y “sustentabilidad” han ganado terreno en las agendas políticas, académicas y empresariales (Anzolin y Lebdioui, 2021). No obstante, su uso indistinto tiende a diluir sus significados específicos. La industria verde suele centrarse en la reconversión tecnológica, la innovación y la eficiencia ambiental en los procesos industriales, mientras que la sustentabilidad remite a una transformación estructural más profunda, que abarca las dimensiones sociales, culturales, económicas y ecológicas del desarrollo (Ashford y Hall, 2011). Esta distinción no es meramente semántica: refleja diferentes enfoques de intervención y, por ende, distintas estrategias para enfrentar los desafíos del siglo XXI.

En este contexto, el presente capítulo parte de la hipótesis de que la producción limpia puede fungir como un puente estratégico entre la industria verde y la sustentabilidad integral. Entendida como un enfoque preven-

tivo de gestión ambiental que busca maximizar la eficiencia en el uso de recursos y minimizar residuos, emisiones y riesgos ambientales, la producción limpia ofrece herramientas prácticas para transformar los procesos productivos sin esperar a que ocurran reformas estructurales profundas (Van Hoof et al., 2018). En países como México, donde coexisten sectores altamente tecnificados con unidades productivas informales o de bajo capital, esta estrategia podría representar una vía intermedia viable para avanzar hacia una política industrial verde que sea ambientalmente eficaz, económicamente competitiva y socialmente justa.

La relevancia de esta reflexión se inscribe en una problemática mayor que atraviesa este capítulo: ¿cómo construir una política industrial verde en un país con múltiples prioridades, profundas desigualdades estructurales y limitaciones institucionales?, ¿hasta qué punto el Estado debe intervenir en los mecanismos de mercado para reorientar los sectores productivos hacia la sostenibilidad?, ¿qué criterios deben guiar el diseño, implementación y evaluación de dichas políticas?, ¿existen modelos viables de transformación que puedan adaptarse al contexto mexicano y cuáles han sido sus resultados hasta ahora?

Este capítulo analiza el papel que puede desempeñar la producción limpia en la construcción de una política industrial verde en México. A partir de este enfoque, se pretende *i)* distinguir conceptualmente la industria verde de la sostenibilidad integral; *ii)* evaluar la adopción de esquemas de producción limpia en distintos sectores económicos; *iii)* identificar barreras y oportunidades para su expansión, y *iv)* proponer criterios para políticas públicas que promuevan su adopción de manera transversal. Todo ello con el fin de contribuir a una discusión informada sobre los instrumentos y enfoques que pueden permitir una transición justa hacia modelos productivos más sostenibles.

La metodología adoptada se basa en una revisión documental y bibliográfica que combina fuentes científicas indexadas y literatura técnica proveniente de organismos internacionales como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Esta revisión se complementa con el análisis de estudios de caso de empresas mexicanas que han implementado

prácticas de producción limpia, seleccionadas con base en criterios como eficiencia energética, uso responsable del agua y los materiales, innovación tecnológica, reducción de impactos ambientales y grado de articulación con marcos regulatorios nacionales e internacionales. Si bien el desarrollo metodológico detallado será presentado en secciones posteriores, este enfoque permitirá identificar patrones comunes entre los casos exitosos y ofrecer lineamientos que orienten la política industrial verde en el país.

En términos de resultados esperados, se anticipa que el estudio permitió establecer conexiones claras entre la adopción de la producción limpia y el mejoramiento del desempeño ambiental y económico de las empresas, especialmente aquellas que operan en contextos de alta presión regulatoria o de acceso a mercados internacionales. También se detectaron obstáculos estructurales, como la falta de incentivos fiscales, financiamiento adecuado o capacidades técnicas locales, que dificultan su implementación a mayor escala. A partir de estos hallazgos, se propondrán recomendaciones para el diseño de instrumentos de política pública que integren la producción limpia como componente clave de una estrategia de desarrollo industrial verde en México.

Así, el capítulo se vincula directamente con los objetivos de este libro al explorar una vía intermedia y viable de transformación productiva que reconcilia la competitividad económica con la protección del medio ambiente, frente a un escenario en el que la acción estatal debe ser estratégica, pero limitada y en el que los sectores productivos presentan una alta heterogeneidad, la producción limpia emerge como un punto de encuentro entre lo deseable y lo posible. De este modo, se abre una discusión fundamental para el diseño de políticas industriales en el siglo XXI: ¿cómo pasar del diagnóstico a la acción concreta sin perder de vista la equidad, la innovación y la resiliencia?

Marco teórico y conceptual

Esta sección profundiza en los conceptos clave, su evolución y su aplicación en el contexto mexicano.

Industria verde y sustentabilidad: convergencias y tensiones

En las últimas décadas, el concepto de industria verde ha emergido como un eje clave dentro de las agendas de innovación, cambio estructural y transición ecológica (Ersin et al., 2024). Su origen está ligado a los esfuerzos por reconvertir sectores industriales altamente contaminantes mediante la introducción de nuevas tecnologías limpias, procesos más eficientes en el uso de recursos, y una mayor responsabilidad corporativa frente a la presión social y normativa por reducir el impacto ambiental (Taj-Taj, 2025). Desde este enfoque, la industria verde representa un intento por compatibilizar crecimiento económico e innovación tecnológica con objetivos ambientales, apelando a la lógica de mercado y a la modernización productiva como motores del cambio.

En este marco, el desarrollo de la industria verde se ha articulado alrededor de nociones como ecoeficiencia, economía circular, tecnologías limpias y descarbonización de la producción (Khan et al., 2025). Es decir, se trata de introducir mejoras en los procesos sin alterar necesariamente la estructura general del sistema económico. Este enfoque tecnocrático se ha traducido, en muchos casos, en estrategias de mitigación y adaptación promovidas desde organismos multilaterales, agencias estatales y grandes conglomerados empresariales, que han adoptado discursos de responsabilidad ambiental, mientras mantienen prácticas orientadas a la rentabilidad y competitividad (Wilshusen, 2019).

En paralelo, el concepto de sustentabilidad, particularmente en su formulación a partir del Informe Brundtland (1987), ha planteado un horizonte más amplio e integrador. La definición clásica de desarrollo sostenible como aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas ha permitido que el término se convierta en una referencia transversal en políticas públicas, acuerdos internacionales y programas educativos (Álvarez-Véliz y Barton, 2024). Sin embargo, su dimensión estructural es lo que lo distingue de enfoques más limitados o instrumentales como el de la industria verde. La sustentabilidad busca articular las dimensiones ambiental, económica y social (Gómez Contreras, 2014). Esto implica no sólo mitigar impactos negativos, sino revisar de forma crítica los fundamentos del mo-

delo de desarrollo dominante, las formas de consumo, las relaciones de poder en la producción y distribución de bienes, y las desigualdades estructurales que afectan tanto a países como a comunidades dentro de ellos (Ptak et al., 2025).

Según Riosvelasco (2015), aunque la industria verde y la sustentabilidad usan herramientas parecidas, como la innovación, el ahorro de energía o la reducción de residuos, tienen enfoques distintos. La industria verde busca hacer mejoras poco a poco dentro del mismo modelo de producción. En cambio, la sustentabilidad impulsa un cambio más profundo, mejorando los procesos productivos mientras nos hace pensar en el propósito y las consecuencias de lo que producimos (Vizcarra, 2023).

Esta diferencia se refleja claramente en la manera en que cada enfoque entiende la relación entre economía y medio ambiente. La industria verde parte de la premisa de que es posible “crecer verde”, es decir, continuar expandiendo la actividad económica mientras se reduce su huella ecológica. Esta idea ha sido central en las políticas de transición energética, en las regulaciones sobre emisiones industriales y en los mecanismos de mercado, como los bonos de carbono o los incentivos fiscales para tecnologías limpias (Tiwari et al., 2024). Sin embargo, múltiples estudios han cuestionado la viabilidad de un crecimiento verde sostenido, señalando que los límites biofísicos del planeta, la crisis de materiales y la desigual distribución de los costos ambientales ponen en duda esa posibilidad (Pineda Ramírez, 2021).

Desde la perspectiva de la sustentabilidad, el problema va más allá de cómo producimos, también incluye para qué lo hacemos, a quién beneficia y en qué condiciones se lleva a cabo (Giovannoni y Fabietti, 2013). Por ello, junto a las herramientas tecnológicas y de gestión, se enfatiza la necesidad de un enfoque territorial, participativo y basado en la justicia ambiental (Jatobá et al., 2009). Esta corriente crítica ha propuesto alternativas como el postdesarrollo, el buen vivir o la economía del cuidado, que colocan en el centro de la discusión al medio ambiente junto con las comunidades, las culturas locales y las relaciones de poder globales (Solón, 2019).

En contextos como el mexicano, donde coexisten realidades productivas altamente divergentes, desde industrias de alta tecnología insertadas en cadenas globales hasta pequeños talleres artesanales con limitada capacidad de inversión, la distinción entre industria verde y sustentabilidad no es úni-

camente teórica, ya que también tiene implicaciones prácticas en el diseño de políticas públicas (Rahman y Hossain, 2024). Una política industrial basada exclusivamente en la industria verde podría privilegiar a los sectores más tecnificados y con mayor acceso a financiamiento, reproduciendo desigualdades estructurales y dejando fuera a amplios sectores de la economía informal o comunitaria. En cambio, una política orientada por principios de sustentabilidad buscaría incorporar mecanismos redistributivos, fortalecer capacidades locales, y articular las transformaciones tecnológicas con procesos sociales inclusivos (Scoones et al., 2020).

Producción limpia: principios, alcances y evolución

Para Van Hoof et al. (2018), la producción limpia surge como una respuesta proactiva a los desafíos ambientales que enfrentan las actividades productivas en todo el mundo. Su propuesta central consiste en anticiparse a los problemas ambientales desde el diseño y la operación de procesos, productos y servicios, a diferencia de las estrategias tradicionales de control y mitigación, que intervienen una vez que los daños ya se han producido. En este sentido, la producción limpia se presenta como una herramienta de gestión ambiental preventiva, orientada a optimizar el uso de recursos, minimizar residuos y emisiones, reducir riesgos para la salud humana y mejorar la competitividad de las organizaciones (Jansen, 2013).

Figuerola et al. (2016) argumentan que el concepto fue desarrollado y promovido inicialmente por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) a finales de la década de 1980, en un momento en que comenzaba a consolidarse la conciencia internacional sobre la insostenibilidad de los modelos de producción y consumo imperantes. El PNUMA definió la producción limpia como “la aplicación continua de una estrategia preventiva integrada aplicada a procesos, productos y servicios, para aumentar la eficiencia y reducir los riesgos para los seres humanos y el medio ambiente” (Fonseca, 2017, p. 47). Esta definición estableció un marco de acción que trasciende la mera mejora tecnológica y se vincula con una visión más integral de la sostenibilidad en la industria.

Para Luken y Navratil (2004), los principios rectores de la producción limpia incluyen:

- La eficiencia energética y de materiales, es decir, hacer más con menos.
- La reducción en la generación de residuos y contaminantes en la fuente.
- El reúso, reciclaje y rediseño de productos y procesos.
- La sustitución de insumos peligrosos por alternativas más seguras.
- La mejora continua de procesos con un enfoque de ciclo de vida.
- La integración de la gestión ambiental en la cultura organizacional y en la toma de decisiones estratégicas.

A diferencia de otros enfoques más limitados, como el control de emisiones al final de la línea (*end-of-pipe*), la producción limpia actúa desde el origen del problema, buscando cambios estructurales en la forma de producir (Huhtala, 2003). Esto la convierte en una estrategia ambiental, económica y organizacional, ya que puede traducirse en reducciones de costos, mejoras en la imagen corporativa, cumplimiento normativo y acceso a nuevos mercados con estándares ambientales más exigentes.

El enfoque de producción limpia ha evolucionado en las últimas décadas, integrándose con otros marcos como la ecoeficiencia, la química verde, la economía circular y las estrategias de desmaterialización (Rahaman y Khan, 2024). En la práctica, estas aproximaciones se complementan; la producción limpia se enfoca en acciones concretas dentro de la organización, mientras que la economía circular amplía la mirada al ciclo de vida del producto y a los sistemas productivos en su conjunto (Melendez et al., 2021). Sin embargo, en todos los casos, se parte de la premisa de que la sostenibilidad no es un límite al crecimiento, sino una oportunidad para la innovación y la mejora del desempeño.

En América Latina, la producción limpia ha sido incorporada progresivamente en las políticas públicas, aunque con grados variables de profundidad y continuidad. Países como Brasil, Chile y Colombia han desarrollado estrategias nacionales de producción más limpia, en algunos casos con

apoyo de cooperación internacional y alianzas con el sector privado (Núñez, 2003). Estas políticas han incluido instrumentos como:

- centros nacionales de producción limpia (CPL),
- líneas de crédito específicas,
- normas técnicas voluntarias,
- esquemas de certificación y
- programas de capacitación y transferencia tecnológica.

En el caso de México, la incorporación de la producción limpia ha sido más fragmentada (Medina Jiménez y Medellín Milán, 2006). Aunque existen lineamientos enmarcados en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley de Transición Energética y el Plan Nacional de Desarrollo, la ausencia de una política industrial sólida ha dificultado una aplicación sistemática. La producción limpia ha sido promovida principalmente a través de iniciativas de la Semarnat, con programas como el Reconocimiento a la Excelencia Ambiental o el fomento de sistemas de gestión ambiental ISO 14001 (Semarnat, s/f). No obstante, la adopción ha dependido en gran medida de la voluntad de las empresas y de incentivos dispersos, sin una articulación estratégica con el desarrollo productivo nacional.

Pese a ello, se han documentado casos exitosos de adopción de producción limpia en sectores como alimentos y bebidas, automotriz, químico y textil (Restrepo Gallego, 2006). Estas experiencias demuestran que, cuando se alinean la regulación, el financiamiento y la capacitación, es posible lograr mejoras significativas en eficiencia, cumplimiento ambiental y rentabilidad. Por ejemplo, empresas que han rediseñado sus procesos para reducir el consumo de agua o energía han reportado ahorros operativos considerables, al mismo tiempo que cumplen con normativas ambientales y acceden a certificaciones internacionales (Ávila y Paiva, 2006).

Uno de los desafíos más relevantes para ampliar el impacto de la producción limpia en México es su escalabilidad, particularmente en el caso de las pequeñas y medianas empresas (pymes), que representan más del 90% de las unidades económicas del país. Estas empresas suelen enfrentar barreras como la falta de acceso al crédito, el desconocimiento tecnológico, la

debilidad institucional o la ausencia de acompañamiento técnico, según Van Hoof et al. (2018). Por ello, uno de los principales aportes de este capítulo es identificar mecanismos de política pública que ayuden a superar estos obstáculos y conviertan la producción limpia en un pilar accesible y útil para sectores diversos.

Política industrial verde en México: retos y avances

En México, la discusión sobre una política industrial verde ha cobrado mayor relevancia en los últimos años, impulsada tanto por compromisos internacionales en materia ambiental como por la necesidad de reactivar sectores productivos estratégicos en un contexto de transición ecológica (Svampa y Viale, 2020). No obstante, esta agenda enfrenta múltiples retos históricos, estructurales e institucionales que dificultan su diseño e implementación efectiva.

Históricamente, México ha carecido de una política industrial sostenida y articulada (Casas y Dettmer, 2007). Desde la apertura económica iniciada en los años ochenta, la estrategia nacional ha estado más centrada en la liberalización comercial y la atracción de inversión extranjera directa que en el fortalecimiento de capacidades industriales locales (Pacheco López, 2005). Esto ha provocado una fragmentación del aparato productivo, donde conviven sectores altamente integrados a cadenas globales (como el automotriz, el electrónico o el aeroespacial) con actividades de bajo valor agregado y escasa innovación tecnológica (Jaimurzina, 2017). Esta heterogeneidad constituye una barrera significativa para la implementación de una política industrial verde con alcance nacional y enfoque inclusivo.

Además, la política ambiental en México ha tendido a funcionar de manera desconectada del aparato productivo, concentrándose en aspectos regulatorios y sancionadores, sin integrar plenamente los incentivos y mecanismos de transformación productiva necesarios para una transición ecológica (Micheli, 2002). Aunque existen leyes y programas relacionados con la sostenibilidad, como la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley de Transición Energética, la Estrategia Nacional de Cambio Climático o el Programa Especial de Producción y Con-

sumo Sustentable, estos han tenido alcance limitado, especialmente en lo que respecta a la articulación con políticas industriales, tecnológicas o de desarrollo económico (CEPAL, 2017).

En los últimos años, sin embargo, se han registrado algunos avances importantes. A nivel institucional, ha habido esfuerzos por incluir criterios ambientales en el diseño de planes sectoriales, como el Programa Sectorial de Energía, el Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales, o el Plan Nacional de Infraestructura (Semarnat, 2024). Asimismo, se han generado espacios de diálogo entre actores públicos y privados en torno a temas como economía circular, transición energética, electromovilidad y sostenibilidad industrial (Gobierno de la Ciudad de México, 2023). Algunos estados y municipios han comenzado a experimentar con normativas locales que promueven procesos productivos más limpios o incentivos para empresas verdes (Álvarez Pascual, 2025).

A nivel internacional, México se ha comprometido con metas ambiciosas a través de acuerdos como el Acuerdo de París, la Agenda 2030 de la ONU, y el esquema CORSIA en el sector aéreo. Estos compromisos implican no sólo la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino también la transformación de patrones de producción y consumo, la inversión en innovación sostenible y el fortalecimiento de capacidades institucionales para la evaluación y monitoreo del desempeño ambiental (Semarnat, 2016). Estos marcos internacionales pueden actuar como catalizadores para el desarrollo de una política industrial verde más robusta, siempre que se traduzcan en acciones concretas y articuladas con la realidad local.

No obstante, persisten retos estructurales que dificultan el avance hacia una política industrial verde efectiva en México. Flores Kelly (2024) destaca:

- La fragmentación institucional, que genera duplicidad de esfuerzos, falta de coordinación y vacíos regulatorios.
- La escasez de instrumentos financieros adecuados para apoyar a empresas, especialmente pymes, en procesos de reconversión tecnológica, eficiencia energética o innovación verde.
- La falta de capacidades técnicas locales, tanto en el sector público como en el privado, para implementar, monitorear y evaluar prácticas de producción sostenible.

- La debilidad en la vigilancia ambiental y la aplicación desigual de las normas, lo que genera incertidumbre y desigualdad de condiciones entre empresas.
- La ausencia de una visión de largo plazo que permita orientar el desarrollo industrial con criterios de resiliencia ecológica, equidad territorial y justicia social. (p. 1)

En este escenario, la producción limpia aparece como una alternativa viable y estratégica para avanzar hacia una política industrial verde desde un enfoque gradual, realista y adaptable a las condiciones del país (Van Hoof et al., 2018). Su flexibilidad permite que sea adoptada tanto por grandes industrias como por pymes, y su enfoque preventivo se alinea con la necesidad de reducir costos ambientales y económicos en el mediano plazo. Además, al estar basada en la mejora continua, puede ser escalada y adaptada de acuerdo con la capacidad tecnológica, la disponibilidad de recursos y el contexto normativo de cada región (Díaz Coutiño y Escárcega Castellanos, 2009).

Asimismo, la producción limpia puede actuar como un punto de encuentro entre políticas sectoriales actualmente dispersas. Por ejemplo, puede vincularse con estrategias de eficiencia energética impulsadas por la Secretaría de Energía; con iniciativas de economía circular promovidas por gobiernos estatales; con programas de educación ambiental desarrollados por la SEP; y con acciones de mitigación del cambio climático lideradas por la Semarnat. Según Marrero y Asuaga (2021), esta capacidad de articulación intersectorial la convierte en un instrumento útil no sólo para las empresas, sino también para la planificación pública.

En términos de política pública, integrar la producción limpia en una estrategia nacional requiere diseñar incentivos adecuados, tanto regulatorios como económicos. Para Van Hoof et al. (2018), esto incluye:

- líneas de financiamiento verde accesibles,
- reconocimientos a empresas líderes en sostenibilidad,
- programas de formación técnica para trabajadores y gestores,
- desarrollo de estándares nacionales de producción limpia,
- mecanismos de seguimiento, evaluación y mejora continua.

Para que una política industrial verde sea legítima y efectiva, debe basarse en criterios de equidad, inclusión y sostenibilidad territorial. La producción limpia, al centrarse en la eficiencia y la prevención, puede contribuir a estos objetivos cuando se aplica con un enfoque integral y articulado entre sectores (Marrero y Asuaga, 2021).

Metodología

Este capítulo se construye a partir de una metodología cualitativa de carácter exploratorio-analítico, cuyo objetivo es examinar el papel de la producción limpia como herramienta para el diseño e implementación de una política industrial verde en México. Se optó por esta estrategia metodológica debido a la necesidad de comprender los marcos conceptuales y normativos que sustentan la producción limpia, sus condiciones reales de aplicación, sus limitaciones estructurales y las oportunidades detectadas en experiencias concretas.

Revisión de literatura científica y técnica

La primera fase del trabajo consistió en una revisión documental de literatura especializada sobre producción limpia, industria verde y política industrial sostenible. Se consultaron bases de datos científicas reconocidas como Scopus, Web of Science, Google Scholar y repositorios institucionales de organismos internacionales como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Esta revisión permitió:

- Sistematizar los principales conceptos y enfoques asociados a la producción limpia.
- Identificar criterios técnicos y operativos utilizados internacionalmente para evaluar su aplicación.

- Recoger evidencias sobre los beneficios económicos y ambientales reportados por su implementación en diversos contextos.
- Revisar las propuestas de política pública orientadas a incentivar su adopción en países con características similares a México.

Análisis de casos exitosos en México

La segunda fase se centró en el análisis de estudios de caso de empresas mexicanas que han adoptado esquemas de producción limpia. La selección se realizó a partir de informes públicos, documentos técnicos, evaluaciones de programas ambientales, boletines institucionales y notas de prensa verificadas. Se priorizaron casos representativos de distintos sectores (como alimentos y bebidas, automotriz, químico y textil), y con evidencias concretas de mejora ambiental y/o económica.

Los criterios para la selección y análisis de los casos incluyeron:

- *Reducción de impacto ambiental*: cambios verificables en la disminución de residuos, emisiones, uso de insumos tóxicos o generación de aguas residuales.
- *Eficiencia energética*: implementación de tecnologías o procesos que redujeron el consumo energético por unidad producida.
- *Uso responsable del agua y materiales*: mejoras en los sistemas de captación, recirculación, o reducción de desperdicios de materias primas.
- *Innovación tecnológica aplicada*: incorporación de nuevas tecnologías, rediseño de procesos o sustitución de insumos por alternativas sostenibles.
- *Articulación con marcos normativos o programas públicos*: alineación con regulaciones ambientales o participación en programas federales o estatales relacionados con la sostenibilidad.

Enfoque interpretativo

El abordaje metodológico adoptado no busca ofrecer una medición cuantitativa del impacto de la producción limpia a escala nacional, sino más bien interpretar su rol potencial dentro de una política industrial verde, a partir de evidencia empírica y conceptual. La perspectiva interpretativa permite explorar el sentido práctico y estratégico de la producción limpia en distintos contextos industriales y su posible escalabilidad bajo condiciones estructurales específicas de México.

Este enfoque resulta particularmente útil dado que:

- La política industrial verde en México aún se encuentra en construcción y carece de un marco consolidado de indicadores.
- Las experiencias empresariales son heterogéneas y muchas de ellas no están sistematizadas en bases de datos oficiales.
- La producción limpia opera como una estrategia transversal, cuya efectividad depende de múltiples factores: económicos, normativos, culturales y tecnológicos.

Limitaciones

Entre las principales limitaciones metodológicas se encuentran:

- La falta de datos públicos sistematizados sobre el número de empresas que han adoptado producción limpia en México.
- La escasez de evaluaciones oficiales de impacto a largo plazo, lo que obliga a complementar la revisión con fuentes alternativas.
- La dispersión de políticas públicas relacionadas, que dificulta una lectura integral desde el diseño gubernamental.
- A pesar de estas limitaciones, la triangulación de fuentes científicas, técnicas y empíricas permite sostener un análisis riguroso, orientado a la generación de propuestas viables para la política pública y la identificación de buenas prácticas replicables.

Resultados y discusión

La revisión documental, junto con el análisis de casos representativos de empresas mexicanas, permitió identificar patrones comunes, limitaciones estructurales y posibilidades reales de integración de la producción limpia en una política industrial verde más coherente e inclusiva para México. Aquí se presenta los hallazgos más relevantes, agrupados en tres dimensiones: beneficios observados, barreras para su escalamiento y propuestas para políticas públicas sostenibles e integradas.

Beneficios comunes en los casos exitosos

Los casos analizados, Grupo Bimbo, Cemex, La Costeña, Grupo Hérdez y varias pymes del sector textil, evidencian que la producción limpia es una estrategia viable desde el punto de vista técnico y económico, además de alinearse con los estándares actuales de competitividad global (Van Hoof et al., 2018). A pesar de las diferencias de tamaño, sector y alcance, se identificaron cinco beneficios clave:

Reducción efectiva del impacto ambiental

Todas las empresas lograron disminuciones verificables en sus emisiones, residuos o consumo de recursos.

- Cemex redujo significativamente sus emisiones de CO₂ mediante coprocesamiento de residuos.
- Bimbo implementó parques eólicos y sistemas de eficiencia energética.
- La Costeña modernizó sus sistemas de tratamiento de aguas, reutilizando recursos hídricos.

Ahorros económicos y mejoras en eficiencia operativa

En la mayoría de los casos, la inversión en tecnologías limpias se recuperó en pocos años mediante ahorros en consumo de energía, agua o materias primas.

- Empresas como Grupo Hérdez reportan disminuciones en el costo energético gracias a paneles solares.
- Pymes textiles, con cambios simples como sustitución de colorantes tóxicos y reutilización de insumos, lograron optimizar procesos.

Cumplimiento normativo y posicionamiento reputacional

Las empresas participantes mejoraron su cumplimiento con regulaciones ambientales nacionales e internacionales, lo que les permitió acceder a certificaciones (ISO 14001, LEED) y mejorar su imagen ante consumidores y socios comerciales.

Fortalecimiento de la cultura organizacional en sostenibilidad

Innovación e integración tecnológica

Aunque con alcances distintos, todas las empresas implementaron nuevas tecnologías o adaptaron sus procesos existentes con el objetivo de reducir su huella ambiental, evidenciando que la innovación actuó como un motor clave en sus estrategias de producción limpia.

En los cinco casos, las empresas integraron criterios ambientales en sus procesos de toma de decisiones, incluyendo capacitación del personal, rediseño de procesos y alianzas con proveedores más sostenibles.

Estos resultados confirman la hipótesis del capítulo la producción limpia puede operar como puente estratégico entre la lógica tecnocrática de la

industria verde y el enfoque estructural de la sostenibilidad, generando beneficios concretos, medibles y escalables.

Limitaciones estructurales para su escalamiento

A pesar de los beneficios, los casos también evidenciaron barreras significativas que impiden su adopción masiva, especialmente entre las pequeñas y medianas empresas, que representan más del 90% del aparato productivo mexicano. Las principales limitaciones identificadas fueron:

- *Acceso restringido a financiamiento.* Muchas pymes carecen de capital de inversión para tecnologías limpias o mejoras en infraestructura. Los programas de crédito verde disponibles son escasos, poco accesibles o desconocidos por la mayoría de las empresas.
- *Falta de capacidades técnicas locales.* Aun con tecnologías viables disponibles, su implementación demanda capacidades técnicas que no siempre se encuentran accesibles, particularmente en zonas periféricas, donde la asistencia y la formación especializada suelen ser limitadas o discontinuas.
- *Débil articulación institucional.* En México, las políticas ambientales, industriales, tecnológicas y educativas continúan funcionando de manera desarticulada, sin una estrategia nacional unificada que incorpore la producción limpia como eje transversal en el desarrollo de una política industrial sostenible.
- *Ausencia de incentivos diferenciados.* Las normativas vigentes tienden a ignorar la heterogeneidad del aparato productivo, imponiendo a las pymes exigencias similares a las de las grandes empresas, pese a que no cuentan con los mismos recursos ni mecanismos de apoyo.
- *Desconocimiento y baja difusión de experiencias exitosas.* El desconocimiento por parte de empresarios y responsables técnicos sobre los casos exitosos y los beneficios de la producción limpia, junto con la ausencia de plataformas efectivas de difusión e intercambio, dificulta la replicación y escalamiento de buenas prácticas en el ámbito productivo.

Estas limitaciones refuerzan la necesidad de diseñar instrumentos de política pública específicos y adaptados a la realidad nacional, que puedan fomentar una transición amplia, inclusiva y con visión de largo plazo (Díaz Coutiño y Escárcega Castellanos, 2009).

Producción limpia como estrategia de política pública

Los resultados permiten afirmar que la producción limpia puede ser una herramienta concreta de política industrial verde, especialmente si se articula con una visión territorial, multisectorial y participativa. A partir del análisis realizado, se identifican tres áreas estratégicas para su incorporación efectiva en la política pública:

Diseño de instrumentos financieros accesibles y flexibles

- Crear fondos verdes destinados a pymes, con tasas preferenciales y acompañamiento técnico.
- Establecer esquemas de cofinanciamiento público-privado para modernización de procesos.

Fortalecimiento de capacidades técnicas y formación especializada

- Implementar programas de capacitación en producción limpia a nivel local, en colaboración con universidades tecnológicas, centros de innovación y gobiernos estatales.
- Incorporar contenidos sobre gestión ambiental preventiva en carreras de ingeniería, administración y tecnología.

Generación de marcos normativos integradores y progresivos

- Establecer estándares técnicos voluntarios por sectores, acompañados de incentivos para su adopción.
- Promover certificaciones nacionales de producción limpia como reconocimiento oficial.

Además, se propone que la producción limpia se integre en el diseño de una política industrial verde con enfoque territorial y equidad social, de modo que se prioricen sectores estratégicos según su impacto ambiental, potencial de innovación y nivel de vulnerabilidad socioeconómica. Esta perspectiva permitiría dirigir apoyos diferenciados a regiones rezagadas, empresas de base comunitaria o sectores de alto impacto como el textil, agroindustrial y transporte (Van Hoof et al., 2018).

Implicaciones para el diseño de una política industrial verde en México

Los hallazgos de este capítulo contribuyen a la discusión general de este libro respecto a cómo diseñar una política industrial verde realista y efectiva en un país desigual y con recursos limitados. Desde esta perspectiva, la producción limpia ofrece una hoja de ruta gradual y técnicamente viable, que puede:

- Reducir el impacto ambiental de sectores clave, sin comprometer la competitividad.
- Democratizar el acceso a tecnologías sostenibles, incorporando a las pymes en la transición.
- Estimular la innovación y la reconversión productiva sin recurrir exclusivamente a grandes reformas estructurales.
- Servir como instrumento de articulación entre objetivos económicos, sociales y ecológicos.

Sin caer en visiones reduccionistas ni en discursos de *engaño verde* (*greenwashing*), la producción limpia se presenta como un puente operativo entre lo posible y lo necesario, que puede acompañar, aunque no sustituyendo, otras transformaciones más profundas hacia la sostenibilidad estructural.

Conclusiones y recomendaciones

La revisión conceptual, el análisis de experiencias empresariales en México y la sistematización de beneficios y limitaciones de la producción limpia permiten afirmar que este enfoque constituye una herramienta estratégica para avanzar hacia una política industrial verde realista, inclusiva y eficaz. En lugar de postularse como una solución única o definitiva, la producción limpia ofrece una vía práctica, escalable y tecnológicamente viable que puede actuar como puente entre la reconversión productiva tecnocrática y la transformación estructural que exige la sostenibilidad integral.

En un contexto como el mexicano, caracterizado por una alta desigualdad productiva, capacidades técnicas fragmentadas y limitaciones institucionales, resulta fundamental priorizar instrumentos que combinen viabilidad económica con impacto ambiental. La producción limpia cumple con este criterio que permite reducir residuos, emisiones y consumos sin detener la producción ni exigir transformaciones radicales inmediatas. Al mismo tiempo, promueve la innovación, mejora la eficiencia operativa y fortalece la cultura organizacional hacia la sostenibilidad.

Los casos documentados demuestran que tanto grandes empresas como pymes pueden beneficiarse de la adopción de estrategias de producción limpia. No obstante, su implementación masiva requiere superar obstáculos estructurales, especialmente en lo que respecta al acceso al financiamiento, la asistencia técnica y la articulación institucional. Sin políticas públicas claras, sostenidas y con enfoque diferenciado por sectores y territorios, los avances seguirán siendo aislados y desiguales.

Este capítulo sostiene que la producción limpia debe ser considerada un componente central y transversal dentro del diseño de una política industrial verde para México. Para ello, se proponen las siguientes recomendaciones:

- a) *Institucionalizar la producción limpia como política nacional.* Es necesario desarrollar una estrategia nacional de producción limpia articulada con los planes de desarrollo industrial, medioambiental y científico-tecnológico. Esta estrategia debe tener objetivos claros, financiamiento asignado y coordinación entre Semarnat, Secretaría

de Economía, Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), Sener y gobiernos estatales.

- b) *Crear mecanismos de apoyo diferenciados para pymes.* Los incentivos deben considerar las desigualdades estructurales del aparato productivo nacional. Las pymes requieren instrumentos financieros accesibles, capacitación técnica local y esquemas de reconocimiento progresivo que les permitan transitar hacia modelos más limpios sin afectar su viabilidad económica.
- c) *Fomentar la formación técnica y la innovación aplicada.* Incluir contenidos de producción limpia en planes de estudio de educación técnica, tecnológica y superior. Crear laboratorios de innovación productiva sustentable en coordinación con universidades, centros tecnológicos y cámaras empresariales para apoyar la adaptación de procesos a contextos específicos.
- d) *Fortalecer la articulación intersectorial y la gobernanza.* La política industrial verde no puede construirse desde un solo sector o secretaría. Se requiere una gobernanza horizontal e inclusiva, que incorpore al sector empresarial, académico, comunidades locales y organizaciones de la sociedad civil. La producción limpia puede ser el eje articulador de esta gobernanza, al permitir enfoques técnicos comunes y metas compartidas.
- e) *Desarrollar un sistema de monitoreo y evaluación.* Todo programa de política pública necesita indicadores y mecanismos de seguimiento. Se recomienda establecer un sistema de monitoreo de desempeño ambiental y económico para las empresas que implementen producción limpia, con indicadores sectoriales y territoriales que permitan evaluar su efectividad y guiar procesos de mejora continua.

Este capítulo reafirma que, en el tránsito hacia una política industrial verde en México, la producción limpia no debe verse como una estrategia menor o auxiliar, sino como una herramienta clave para acercar los discursos de sostenibilidad a la práctica cotidiana de las empresas, especialmente en contextos de alta heterogeneidad productiva y presupuestaria. Su potencial reside precisamente en su flexibilidad, adaptabilidad y capacidad para

generar beneficios múltiples, ambientales, económicos y sociales, sin necesidad de esperar reformas estructurales profundas.

Frente a los desafíos globales del cambio climático y la urgencia de transformación de los modelos productivos, la producción limpia representa una oportunidad concreta para avanzar en el diseño de políticas públicas sostenibles, centradas en la innovación, la equidad y la resiliencia. México cuenta con la capacidad, el conocimiento y la experiencia necesarios para dar este paso, pero requiere una decisión política clara y una estrategia coherente que articule los esfuerzos existentes hacia un futuro más justo y ambientalmente responsable.

Referencias

- Álvarez Pascual, N. (2025, 12 de mayo). Así puedes aprovechar los incentivos fiscales verdes que proporciona el Estado de México. *El Sol de Toluca*. <https://oem.com.mx/elsoldetoluca/local/asi-puedes-aprovechar-los-incentivos-fiscales-verdes-que-proporciona-el-estado-de-mexico-21076492>
- Álvarez-Véliz, R. y Barton, J. R. (2024). The historical geography of an idea: sustainable development in Latin America, 1972-2022. *Journal of Historical Geography*, 86, 175-186.
- Anzolin, G. y Lebdioui, A. (2021). Three dimensions of green industrial policy in the context of climate change and sustainable development. *The European Journal of Development Research*, 33(2), 371-405.
- Ashford, N. A. y Hall, R. P. (2011). *Technology, globalization, and sustainable development: Transforming the industrial state*. Yale University.
- Ávila, G. J. y Paiva, E. L. (2006). Processos operacionais e resultados de empresas brasileiras após a certificação ambiental ISO 14001. *Gestão & Produção*, 13, 475-487.
- Casas, R. y Dettmer, J. (2007). *Construyendo un paradigma de política científico-tecnológica para México: Educación, ciencia, tecnología y competitividad México*, D.F. Miguel Ángel Porrúa.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2017). *Políticas industriales y tecnológicas en América Latina*. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/42363-politicas-industriales-tecnologicas-america-latina>
- Díaz Coutiño, R. y Escárcega Castellanos, S. (2009). *Desarrollo sustentable: Una oportunidad para la vida*. McGraw-Hill Interamericana.
- Ersin, Ö. Ö., Ustabaş, A. y Usman, O. (2024). The role of environmental innovation on ecologic footprint in nations with high technology exports concentrations in international trade. *Technological Forecasting and Social Change*, 208, 123703.

- Figuerola, A. A. B., Parada, C. J. B. y Márquez, A. F. M. (2016). Producción más limpia: una revisión de aspectos generales. *I3+*, 3(2), 66-85.
- Flores Kelly, J. (2024, 2 de agosto). Redefinición de la política industrial en México: Retos y oportunidades. *El Economista*. <https://www.eleconomista.com.mx/economia/Redefinicion-de-la-politica-industrial-en-Mexico-Retos-y-oportunidades-20240802-0050.html>
- Fonseca, H. F. (2017). La producción más limpia como estrategia ambiental en el marco del desarrollo sostenible. *Revista Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*, 4(8).
- Giovannoni, E. y Fabietti, G. (2013). What is sustainability? A review of the concept and its applications. *Integrated reporting: Concepts and cases that redefine corporate accountability*, 21-40.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2023, 12 de septiembre). *Impulsamos la transición energética*. <https://gobierno.cdmx.gob.mx/noticias/impulsamos-la-transicion-energetica/>
- Gómez Contreras, J. L. (2014). Del desarrollo sostenible a la sustentabilidad ambiental. *Revista Facultad de Ciencias Económicas: Investigación y Reflexión*, 22(1), 115-136.
- Huhtala, A. (2003). Promoting financing of cleaner production investments: UNEP experience. *Journal of Cleaner Production*, 11(6), 615-618.
- Jaimurzina, A., Muñoz, C. y Pérez, G. (2017). *Género y transporte: Experiencias y visiones de política pública en América Latina*. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/28f7de50-7e39-44d7-878b-e71a45b9e685/content>
- Jansen, C. S. (2013). *Aplicação da produção mais limpa como ferramenta para melhoria contínua do sistema de gestão de saúde, segurança e meio ambiente*.
- Jatobá, S. U. S., Cidade, L. C. F. y Vargas, G. M. (2009). Ecologismo, ambientalismo e ecología política: Diferentes visões da sustentabilidade e do território. *Sociedade e Estado*, 24, 47-87.
- Khan, R. Z., Razak, L. A. y Premaratne, G. (2025). Green growth and sustainability: A systematic literature review on theories, measures and future directions. *Cleaner and Responsible Consumption*, 100274.
- Luken, R. A. y Navratil, J. (2004). A programmatic review of UNIDO/UNEP national cleaner production centers. *Journal of Cleaner Production*, 12(3), 195-205.
- Marrero, A. S. V. y Asuaga, C. (2021). Gestión ambiental en las organizaciones: una revisión de la literatura. *Revista del Instituto Internacional de Costos*, 1(8), 5.
- Medina Jiménez, A. y Medellín Milán, P. (2006). La experiencia de adopción de la producción más limpia en el sector de la fundición de México. *Innovar*, 16(28), 173-186.
- Melendez, J. R., Delgado, J. L., Chero, V. y Rodríguez, J. F. (2021). Economía circular: Una revisión desde los modelos de negocios y la responsabilidad social empresarial. *Revista Venezolana de Gerencia*, 26(6), 560-573. <https://doi.org/10.52080/rvg-luz.26.e6.34>
- Micheli, J. (2002). Política ambiental en México y su dimensión regional. *Región y Sociedad*, 14(23), 129-170.
- Núñez, G. (2003, noviembre). *La responsabilidad social corporativa en un marco de de-*

- sarrollo sostenible* (serie Medio Ambiente y Desarrollo, 72). CEPAL, División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/4fa567cb-d58f-454e-8d10-9c08b922cc86/content>
- Pacheco López, P. (2005). Liberalización de la política comercial y crecimiento económico de México. *Economía UNAM*, 2(4), 84-93.
- Pineda Ramírez, C. E. (2021). Límites y contradicciones del capital en la naturaleza. *Problemas del desarrollo*, 52(207), 157-178.
- Ptak, T., Brooks, J. y Stock, R. (2025). A systematic review and typology of power outage literature: Critical infrastructure, climate change and social impacts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 218, 115778.
- Rahaman, T. y Khan, S. H. (2024, marzo). Green merchandising of textiles and apparel in a circular economy: Recent trends, framework, challenges and future prospects towards sustainability. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 11(1), 100457.
- Rahman, M. M. y Hossain, M. E. (2024). Green technology, policy and sustainable finance nexus with SDG-12: Moderating effects of stakeholder awareness. *Sustainable Futures*, 8, 100405.
- Restrepo Gallego, M. (2006). *Producción más limpia en la industria alimentaria*. <https://repository.unilasallista.edu.co/items/6c21116b-d214-4488-a20a-4d2f3f02df18>
- Riosvelasco, P. O., Argüelles, V. T., Morales, S. A. N., Martínez, E., Castaño, V. M. y Solís, S. S. (2015). Conceptos de una industria verde: revisión de literatura. *Cultura Científica y Tecnológica*, 12(55), 40-51.
- Scoones, I., Stirling, A., Abrol, D., Atela, J., Charli-Joseph, L., Eakin, H., ... y Yang, L. (2020). Transformations to sustainability: Combining structural, systemic and enabling approaches. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 42, 65-75.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2016, 21 de septiembre). *Ratificación de México ante la ONU del Acuerdo de París*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/ratificacion-de-mexico-ante-la-onu-del-acuerdo-de-paris>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2024). *Avance y resultados enero 2023 - junio 2024: Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2020-2024 (Promarnat)*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/946747/16_PS_PROMARNAT_AyR2324.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (s/f). *Normas ISO 14001 y desempeño ambiental*. <https://shorturl.at/ip42x>
- Solón, P. (2019). Alternativas sistêmicas: *Bem viver, decrescimento, comuns, ecofeminismo, direitos da Mãe Terra e desglobalização*. Elefante.
- Svampa, M. y Viale, E. (2020). *El colapso ecológico ya llegó: una brújula para salir del (mal) desarrollo*. Siglo XXI.
- Taj-Taj, J. I. (2025). *Chile sostenible: Diversificación, innovación y transición verde en el siglo XXI*.
- Tiwari, S., Shahzad, U., Alofaysan, H., Walsh, S. T. y Kumari, P. (2024). How do renewable

energy, energy innovation and climate change shape the energy transition in USA? Unraveling the role of green finance development. *Energy Economics*, 140, 107947.

Van Hoof, B., Monroy, N. y Saer, A. (2018). *Producción más limpia: Paradigma de gestión ambiental*. Alfaomega.

Vizcarra, G. A. (2023). Economía circular en el marco de los objetivos de desarrollo sostenible, una oportunidad para la sinergia social. *Telos*, 25(3), 868-889.

Wilshusen, P. R. (2019). Environmental governance in motion: Practices of assemblage and the political performativity of economistic conservation. *World Development*, 124, 104626.

5. Avances en tecnologías de aprendizaje automático e inteligencia artificial para procesos y desastres hidrológicos*



JORGE ALEJANDRO SILVA RODRÍGUEZ DE SAN MIGUEL**

CHRISTIAN MUÑOZ SÁNCHEZ***

DULCE MARÍA MONROY BECERRIL****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.05>

Resumen

El avance del aprendizaje automático y la inteligencia artificial se han convertido en avances tecnológicos pioneros que han transformado el campo de la hidrología, con sus ofertas sin precedentes de herramientas nuevas que se pueden utilizar para modelar procesos hidrológicos complejos y administrar catástrofes hidrológicas. En esta revisión de la literatura, se resumen los avances pertinentes en la IA/ML, aplicaciones relativas a pronóstico de inundaciones, predicción de sequías e hidrología para informar sobre la precisión de predicción, la escala de las aplicaciones y la capacidad de tiempo real del monitoreo de los desarrollos más recientes. Las técnicas emergentes como las arquitecturas de aprendizaje profundo, incluido las redes neuronales recurrentes con unidades (LSTM), las redes neuronales convolucionales (CNN) y otras, modelos de conjunto y marcos híbridos, muestran una mejora significativa en comparación con los modelos hidrológicos tra-

* Derivado del proyecto SIP 20240598: "Responsabilidad social empresarial y sostenibilidad en el abastecimiento de agua".

** Doctor en Ciencias Administrativas. Profesor del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-4696> ; correo electrónico: jasilva@ipn.mx

*** Doctor en Ciencias Sociales. Profesor-investigador del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8692-4252>

**** Doctora en Administración Pública. Profesora-investigadora del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0787-5577>

dicionales al conseguir dinámicas no lineales y tiempos significativamente mejorados para la prevención de las intervenciones y medidas de desastre. Además de la integración mejorada de sensores de internet de las cosas (IoT), datos de teledetección y marcos de *big data* para la implementación de monitoreo de tiempo real y sistemas de alerta temprana. La revisión señala brechas críticas, que incluyen la falta de evaluación a largo plazo y la contextualización y falta de escala de implementación de IA. El artículo concluye con recomendaciones para futuras investigaciones que incluyen la exploración de enfoques híbridos, la promoción de plataformas de colaboración intersectorial y la integración de herramientas de IA en marcos políticos y de gobernanza.

Palabras clave: *aprendizaje automático, inteligencia artificial, pronóstico de inundaciones, predicción de sequías, sistemas de alerta temprana.*

Introducción

Los procesos hidrológicos son responsables del movimiento, la distribución y la gestión de los recursos hídricos de la Tierra y son esenciales para mantener los ecosistemas y el sostén de la agricultura y el consumo humano (Yang et al., 2021). Cada uno de estos procesos, a saber, la precipitación, la evaporación, la escorrentía, la infiltración y el flujo de aguas subterráneas, se determina de las condiciones climáticas y factores geográficos. Interrumpir estos procesos puede resultar en inundaciones y sequías, que se conocen a nivel mundial como desastres hidrológicos (Yang et al., 2021). Las inundaciones son uno de los peligros naturales más frecuentes e intensos en el mundo. Cada año, millones de personas se ven afectadas por ellos, y las pérdidas económicas son significativas (Manzoor et al., 2022; Mishra, 2021). Las sequías, en cambio, a menudo surgen más lentamente, pero sus consecuencias a menudo duran años y años. Estos incluyen la disminución de los rendimientos de cultivos, la escasez de agua y la degradación de los ecosistemas (Manzoor et al., 2022; Mishra, 2021).

Como se mencionó anteriormente, la urgencia en la gestión de los procesos hidrológicos está creciendo debido al cambio climático, la alteración

de los patrones de precipitación y la urbanización. Esto exacerba los procesos hidrológicos extremos, incluidas las sequías y las inundaciones repentinas (Xiong y Yang, 2024). Estos cambios, junto con el crecimiento de la población y la expansión urbana, añaden presión a la infraestructura hídrica y aumentan la vulnerabilidad en terrenos inundables y zonas con escasez de agua (Xiong y Yang, 2024). Los marcos de políticas, como el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres, hacen hincapié en los sistemas de alerta temprana, las evaluaciones de riesgos y la gestión integrada de los recursos hídricos para abordar este desafío (Xiong y Yang, 2024). Dado que los modelos hidrológicos tradicionales tienen limitaciones significativas en su capacidad para manejar dinámicas complejas y enormes demandas de información, se necesita un enfoque más avanzado, adaptable y basado en datos (Xiong y Yang, 2024).

El ML y la IA proporcionan soluciones innovadoras a dichos desafíos. Al procesar con precisión conjuntos de datos grandes y heterogéneos, como imágenes satelitales y datos de sensores, el ML y la IA son superiores, en términos de precisión predictiva, a los métodos más tradicionales, específicamente a través de técnicas de vanguardia, como el aprendizaje profundo y el ensamble de métodos (Rai et al., 2024). Dichas tecnologías aumentan la previsión de inundaciones en tiempo real, la predicción de sequías y la administración de recursos hídricos condensando flujos de datos en herramientas de toma de decisiones de apoyo para mejorar la administración de desastres y fomentar metas de sostenibilidad globales. Aunque existe un gran potencial, desafíos como la calidad de los datos, la interpretabilidad de los modelos y la implementación en escenarios con escasos recursos dificultan el pleno fructificado de sus beneficios (Rai et al., 2024).

Esta revisión de la literatura contribuye a la consolidación del conocimiento existente sobre ML e IA en hidrología y se enfoca en los avances en previsión de inundaciones, avances en predicción de sequías, y avances en la gestión de cuencas hidrográficas. Además, analiza las tendencias y avances tecnológicos, llama la atención sobre las lagunas de investigación y realiza comparaciones con métodos alternativos, al tiempo que ubica cómo estas metodologías mejoran los enfoques de precisión, seguimiento en tiempo real y toma de decisiones basadas en la gestión del agua estándar. La revisión retoma artículos desde 2019 hasta 2025, mientras que el periodo

que se apropia rápidamente de los avances en IA es marcado por el rebrote y la publicación de estudios que relacionan IA con áreas más afectadas por desastres hidrológicos o áreas ricas en datos como Asia, América del Norte, Europa y África.

Los conceptos básicos de ML e IA, incluido el aprendizaje profundo, las redes neuronales y el modelado basado en datos, son fundamentales para los datos de alta dimensión y la complejidad junto con los modelos hidrológicos tradicionales basados en la física. Dichos modelos abordan procesos hidrológicos que son la precipitación, escorrentía, infiltración y evapotranspiración procesos esenciales para la gestión del agua y la planificación ante desastres. Los fenómenos adversos, inundaciones, sequías y marejadas ciclónicas, aumentan en intensidad y frecuencia debido al cambio climático y la urbanización exigen herramientas con potencial para predecir con anticipación ante la toma de decisiones que mejoren la resiliencia y sostenibilidad.

La revisión se divide en cuatro secciones principales, entre ellas, método, marco teórico y revisión de los hallazgos.

Método

El sistema de revisión sistemática desarrollado para estudiar las aplicaciones de ML e IA en hidrología fue diseñado como exhaustivo y riguroso. La recolección de los estudios fue basada en las guías estándar para revisión sistemática y fue relacionada con bases de datos incluyendo Web of Science, Scopus, IEEE Xplore y Google Scholar como fuente complementaria. Para asegurar la cobertura completa se han utilizado controladores Booleanos y combinaciones de palabras claves incluyendo “machine learning”, “artificial intelligence”, “hydrology”, “flood”, “drought”, “watershed”, “hydrology resources management”. Las cadenas fueron iterativamente refinadas para incluir las variaciones terminológicas, por ejemplo, otras frases como “data-driven modeling” o “flood-risk assessment”. Las publicaciones han sido seleccionadas por lenguaje, que en este caso es inglés, y han sido limitadas hasta 2019-2025: revistas académicas revisadas por pares, capítulos de libros utilizando el mismo año para garantizar su actitud relevante y calidad. Los criterios de elegibilidad enfatizaron la consideración del estudio de todos

los ensayos entre ellos la relevancia tecnológica se implementó llevándola a cabo, así como a adquirir nueva información empírica, diseño de nuevos modelos o reconfiguración de antiguos. Documentos no académicos, que no tienen relevancia y la publicación que no está en inglés fueron excluidos.

El proceso de selección y cribado se compuso de dos etapas. Los títulos y resúmenes fueron revisados en la fase preliminar por dos revisores independientes para incluir estudios que cumplieran con los criterios de inclusión: metodologías de aprendizaje estadístico o inteligencia artificial pertinentes para la hidrología, además de la fecha y el idioma. Las discrepancias entre los revisores se resolvieron mediante discusión o consulta de un tercero. Los artículos que superaron la fase preliminar fueron sometidos a una revisión a texto completo intensiva para confirmar sus narrativas y metodologías. Esta fase excluyó los estudios con metodologías insuficientemente rigurosas o sin datos para su revisión adecuada.

Para garantizar la calidad, la revisión se sirvió de herramientas adicionales como la lista de verificación Prisma 2020 la credibilidad y relevancia de las listas de verificación (CASP), asimismo, como una herramienta de riesgo de sesgo modificada de cuestiones larvadas relacionadas con tamaño de la muestra, la ubicación y disponibilidad de los datos. Los estudios se calificaron en función de la claridad de los objetivos, presentación de los datos y el aprendizaje comparativamente estadístico o de aprendizaje. Los estudios que otras calcularon menos de un umbral predefinido también se marcaron para revisión adicional o exclusión.

Los intentos de atenuar tales sesgos incluyeron la recuperación de literatura de varias bases de datos, a fin de minimizar el sesgo de publicación, verificar las revisiones independientes para reducir el sesgo de selección y el uso de instrumentos adicionales tales como los gráficos en embudo para analizar la variabilidad en los resultados de los estudios. Aunque se desempeñaron de manera dubitativa debido a la variedad de procedimientos metodológicos en los estudios de ML/IA proporcionaron información adicional. Un procedimiento completo y detallado aseguró la recuperación de estudios no tendenciosos y de alta calidad, estableciendo el escenario para la revisión de los avances hídricos en aplicaciones de aprendizaje automático e inteligencia artificial.

Marco teórico

Perspectivas históricas sobre la IA en hidrología

Antes de la generalización de IA, AA en la hidrología, los investigadores primas, modelo basado principalmente en modelos estadísticos y deterministas basados en la física, se aplican para simular y predecir procesos hidrológicos. Los modelos estadísticos se usaban para identificar relaciones lineales entre variables hidrológicas que producían imágenes mientras se usaban para generar junto con índices de sequía en situaciones donde el clima es más estable (Soares y do Carmo Calijuri, 2021; Singh et al., 2023). Por ejemplo, los modelos de regresión-lineal múltiple MLR y de medias móviles integradas autorregresivas EXTI ARIMA se usaron con frecuencia y se diseñaron antes. La regresión del índice de medias móviles lineales desencadenadas en series temporales fue un precursor importante de los métodos de estadística aplicados posteriormente en métodos derivados de datos (Soares y do Carmo Calijuri, 2021; Singh et al., 2023). Por otro lado, los modelos basados en la física determinista buscan representar leyes generalistas que gobiernan los procesos hidrológicos.

Normalmente se aplican para ecuaciones parámetros de calibración diferenciales y ampliadas (Shen et al., 2023). Por mencionar algunos ejemplos, el SWAT (herramienta de evaluación de suelos y aguas), cuyos datos se obtienen con precisión espacial y se emplean para prever los efectos del uso del suelo y las alteraciones en el clima en tres componentes de balance hídrico (Shen et al., 2023; Nascimento, 2020). Con cuerpos hídricos en escala de cuencas y velocidad del agua un HEC-HMS (sistema de modelado hidrológico).

Si bien estos modelos son expertos en la representación de procesos, a menudo presentan limitaciones en cuanto a disponibilidad de datos, incertidumbre de los parámetros y complejidad computacional, especialmente cuando se trata de simular cuencas más grandes o escasas en datos (Shen et al., 2023; Nascimento, 2020). Estos desafíos favorecieron la generación y el impulso de modelos alternativos y más flexibles a principios de los modelos de la RNA fueron el resultado de los primeros intentos de expresar tales

relaciones no lineales inherentes a las series temporales hidrológicas (Shen et al., 2023; Nascimento, 2020).

Dichas aplicaciones supusieron una desviación de las restricciones y suposiciones rígidas en la línea y distribuciones de parámetros, siendo reemplazadas por el aprendizaje en base a datos observados para generar patrones (Guan et al., 2020). Esta tendencia marcó una ruptura drástica desde el paradigma convencional y forzó a los investigadores hidrológicos a explorar las capacidades de la CI para resolver los fenómenos hidrológicos que abarcaron sobre las múltiples escalas (Guan et al., 2020). Esto hizo que se aplicara este espectro de IA/ML para técnicas de modelación hidrológica. Por ejemplo, la lógica difusa trató con incertidumbre e imprecisión notables en la relación entre la lluvia y la escorrentía, y los algoritmos genéticos proporcionaron enfoques de búsqueda y optimización para la calibración del modelo (Yaseen, 2023). Con el tiempo, estas técnicas evolucionaron aún más y dieron lugar a arquitecturas de aprendizaje profundo como CNN, RNA con partes LSTM que podían abordar conjuntos de datos voluminosos, incluidos las entradas características de las operaciones de teledetección y los datos de sensor en tiempo real (Yaseen, 2023).

Varias razones respaldaron este cambio hacia el modelado basado en datos: los avances computacionales, como el auge de la computación de alto rendimiento y las plataformas en la nube, que redujeron los tiempos de entrenamiento para modelos computacionalmente intensivos; la creciente disponibilidad de datos, como la proliferación de imágenes satelitales, redes de sensores terrestres y bases de datos climáticas de acceso abierto, que proporcionaron datos ricos y heterogéneos para alimentar modelos de IA más complejos; y la mayor sofisticación de los modelos, a saber, la aparición de nuevos marcos de aprendizaje automático, como las redes neuronales profundas, que ofrecieron un mejor rendimiento en la captura de los procesos hidrológicos intrincados y no lineales en comparación con la regresión tradicional o las redes Neuronales Artificiales (ANN) simples (Guan et al., 2020; Khan y Zakarya, 2021).

A medida que estos métodos maduraron, surgieron modelos híbridos más sofisticados que combinaban el conocimiento del dominio con las formulaciones basadas en el aprendizaje profundo. Estos enfoques combinaban la flexibilidad y la eficiencia predictiva integral de la IA con una sólida base

de conocimiento físico dentro de un sólo marco, lo que les permitió superar en muchos aspectos tanto a la IA pura como a los enfoques basados en la física. Hoy en día, los investigadores continúan perfeccionando y ampliando estos enfoques, aprovechando los avances en IA explicable y cuantificación de la incertidumbre (Kouraytem et al., 2021; Wang et al., 2022).

Principales académicos, grupos de investigación y escuelas de pensamiento

En síntesis, una red global de investigadores e instituciones ha contribuido a hacer avanzar la Inteligencia Artificial en hidrología, innovar tanto en la teoría como en la aplicación y fomentar la colaboración en el trabajo. Los pioneros innovadores, como Soroosh Sorooshian de la Universidad de California, Irvine, presentaron por primera vez modelos puramente basados en datos para la gestión de recursos hídricos aquí; UPmanu Lall de la Universidad de Columbia avanzó la competencia de aprendizaje automático en gestión de riesgos hídricos y previsión hidrológica; y Vijay P. Singh de la Universidad Texas A&M introdujo enfoques de IA híbrida en la dinámica de las cuencas hidrográficas; mientras que ZM Yaseen se centró en el aprendizaje profundo en la predicción de inundaciones y sequías, haciendo énfasis en el rendimiento y la interpretabilidad.

Además, la integración de la IA con la teledetección y el *big data* para la hidrología de regiones frías y el monitoreo a gran escala también es un enfoque pionero en el Instituto Global para la Seguridad del Agua de la Universidad de Saskatchewan y el Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA. Para la previsión basada en la red, los liderazgos europeos, como HEPEX, y las organizaciones, como Deltares y ETH Zurich, se han adelantado con herramientas mejoradas por IA. Además, instituciones como la UNESCO, el Programa Internacional de la Geosfera y la Biosfera (IGBP) y el Programa Mundial de Investigación de Clima (WCRP) han estado fomentando proyectos relacionados con IA interdisciplinarios para la modelación fluvial CC. De los modelos estadísticos hidráulicos estáticos a los marcos de IA dinámicos, se han creado instrumentos innovadores para la gestión de de-

sastres y recursos hídricos y aplicaciones al consumidor, y así poder llevar los marcos de políticas.

Debates o controversias en curso

Confiabilidad del modelo frente a interpretabilidad

Uno de los debates más destacados en la hidrología basada en IA dice relación con la compensación entre la confiabilidad y la interpretabilidad del modelo (Hassija et al., 2024; Ivanovs et al., 2021). En general, los modelos de *black box*, que incluyen en particular las redes neuronales profundas, a menudo logran un rendimiento predictivo sorprendente al capturar relaciones complejas y no lineales que pueden pasar desapercibidas por enfoques más simples y tradicionales impulsados por datos (Hassija et al., 2024; Ivanovs et al., 2021). Sin embargo, estos modelos avanzados carecen de explicaciones simples de cómo los insumos se convierten en resultados, lo que plantea preocupaciones sobre su transparencia y confiabilidad para ser utilizados en la gestión de recursos hídricos (Hassija et al., 2024; Ivanovs et al., 2021). La interpretabilidad es esencial en situaciones de política y gobernanza pública y el compromiso de las partes interesadas, ya que los tomadores de decisiones enfrentan la tarea de razonar claramente y justificar sus esfuerzos para intervenir en situaciones de inundaciones, sequías, y similares (Hassija et al., 2024; Ivanovs et al., 2021).

En un intento por mitigar esta preocupación, algunos investigadores han propuesto técnicas de IA explicables como mapas de saliencia, medidas de importancia de características y explicaciones locales interpretables independientes del modelo (Hassija et al., 2024; Ivanovs et al., 2021). No obstante, otros mantienen que el requerir total interpretabilidad puede comprometer el rendimiento predictivo de los modelos de IA, sugiriendo que los enfoques híbridos ofrecen el mejor equilibrio entre confiabilidad y claridad (Hassija et al., 2024; Ivanovs et al., 2021). En resumen, subyace una controversia fundamental: ¿cuánta opacidad es aceptable en la mecánica del modelo, si su confiabilidad mejorada puede radicalmente mejorar las evaluaciones de riesgos y planificación de recursos?

Calidad y disponibilidad de los datos

Los modelos de IA para la hidrología requieren amplios conjuntos de datos de alta calidad para el entrenamiento y la validación. A pesar de esto, la escasez de datos, los errores en las mediciones y las redes de sensores erráticas siguen siendo desafíos significativos globales (Kebede et al., 2024; Şen, 2021). En muchos lugares en desarrollo, la falta de infraestructura hidrometeorológica sólida da como resultado registros incompletos o poco fiables, sofocando los progresos en soluciones de ML de vanguardia. Los desafíos aún persisten incluso en países desarrollados, ya sea por formatos de datos dispersos y patentados que interrumpen un acceso abierto (Kebede et al., 2024; Şen, 2021).

Se añade un nivel adicional de controversia con los datos parciales, a menudo con errores humanos, como la representación desigual e insuficiente de los regímenes hidroclimáticos o los años de salida. Los modelos entrenados en datos sesgados emiten pronósticos sesgados porque no se ajustan lo suficiente para capturar la verdadera variabilidad de los procesos hidrológicos; no pueden generalizarse a través de las cuencas (Kebede et al., 2024; Şen, 2021).

Al mismo tiempo, las imágenes de satélites de alta resolución y las redes de sensores de IoT llenan los vacíos de los datos, también introducen calibración y desafíos de integración. Con todo, los investigadores discuten si el aumento de datos *ad hoc* o los enfoques de aprendizaje por transferencia puede vencer suficientemente las limitaciones de los datos o si las inversiones son demasiado importantes en mediciones de campo y verificación de campo (Kebede et al., 2024; Şen, 2021).

Consideraciones éticas y políticas

A medida que las aplicaciones de IA en hidrología se vuelven más sofisticadas y potencialmente automatizadas, las dimensiones éticas y políticas se vuelven cada vez más importantes (Aldahlawi et al., 2024; Chitwatkulsiri y Miyamoto, 2023). Por ejemplo, las predicciones algorítmicas podrían cambiar drásticamente la asignación de agua, la planificación urbana o las es-

trategias de evacuación en caso de inundación, lo que plantea preguntas sobre la justicia, la equidad y la responsabilidad en la toma de decisiones (Aldahlawi et al., 2024; Chitwatkulsiri y Miyamoto, 2023).

Los posibles sesgos dentro de los modelos de IA, derivados de un muestreo de datos inadecuado o suposiciones del modelo, podrían poner en peligro a las comunidades marginadas o subrepresentadas en regiones propensas a inundaciones o con escasez de agua (Aldahlawi et al., 2024; Chitwatkulsiri y Miyamoto, 2023). Además, los marcos de políticas en muchos países no han seguido el ritmo de las rápidas innovaciones de la IA. Esta brecha genera incertidumbre en cuanto a la gobernanza de los datos, los derechos de propiedad intelectual para las herramientas hidrológicas impulsadas por la IA y la responsabilidad cuando las decisiones basadas en modelos genéticos producen patrones subóptimos o perjudiciales (Aldahlawi et al., 2024; Chitwatkulsiri y Miyamoto, 2023).

Revisión de los hallazgos

Algoritmos de aprendizaje automático

Las redes neuronales se han convertido en uno de los pilares clave en la aplicación de la IA a los procesos hidrológicos, desconocidos en la facultad de aprender relaciones complejas y no lineales de grandes conjuntos de datos (Lee, 2024; Mishra et al., 2022). La primera se basó en el uso de perceptrones multicapa para el modelado de lluvia y escorrentía. Las novedades más recientes se enfocan en redes neuronales profundas, aprovechando algoritmos de aprendizaje automático para extraer patrones multiescala (Lee, 2024; Mishra et al., 2022).

En el ámbito de la arquitectura profunda, las redes de convolución CNN se han revelado efectivas para explotar las dependencias espaciales, fomentando la integración de imágenes de teledetección, modelos digitales de elevación y clasificaciones de uso de la tierra (Lee, 2024; Mishra et al., 2022). Por otra parte, en los casos de pronóstico de series temporales, como los caudalpredicciones o las inundaciones, las Redes Neuronales de

Memoria a Corto y Largo Plazo LSTM han surgido en calidad de alternativa (Lee, 2024; Mishra et al., 2022).

Más allá del marco del aprendizaje profundo, las técnicas de ensamble, como RF, GB y XGBoost, han demostrado un sólido desempeño en tareas de clasificación y regresión. La adopción de estos algoritmos combina múltiples aprendices débiles, p. ej., árboles de decisión, siendo eficientes para reducir la varianza y fortalecer la generalización de los resultados (Lee, 2024; Mishra et al., 2022). En varios casos, los enfoques híbridos o novedosos asisten para la resolución, p. ej., sistemas neurodifusos, combinando las características de las redes neuronales y las oportunidades de la lógica difusa (Lee, 2024; Mishra et al., 2022).

También, los investigadores experimentan con el aprendizaje por transferencia, entrenando modelos preentrenados de una cuenca o región climática en otra que adolece de datos de observación (Lee, 2024; Mishra et al., 2022). Investigaciones de vanguardia sugieren que los enfoques híbridos de aprendizaje automático y físico pueden cerrar aún más la brecha entre la interpretabilidad y la precisión predictiva a través de la integración del conocimiento del dominio en arquitecturas de IA avanzadas (Lee, 2024; Mishra et al., 2022).

Asimismo, el aprendizaje por refuerzo se experimenta entre las direcciones potenciales de desarrollo, adaptando las operaciones de los embalses y las estrategias de asignación de agua y permitiendo que los agentes de IA aprendan a igualar demandas de agua en competencia con un clima inestable (Lee, 2024; Mishra et al., 2022). Las redes neuronales generativas antagónicas se utilizan para sintetizar o aumentar los datos hidrológicos, p. ej., patrones de precipitaciones simuladas o cumplimentación de sensores faltantes (Lee, 2024; Mishra et al., 2022). Estas innovaciones sirven de manifestación concreta de la voluntad constante de los investigadores de desarrollar soluciones flexibles y adaptativas que pueden enfrentarse al desafío de la incertidumbre inherente en el campo de los sistemas hidrológicos (Lee, 2024; Mishra et al., 2022).

Big data y herramientas computacionales

A medida que se incrementan los volúmenes de datos hidrológicos y climáticos debido a las mejoras en la teledetección, las redes de sensores y las plataformas de modelación, las infraestructuras basadas en la nube y HPC se han vuelto esenciales (Mittal y Vaishay, 2019; Shuvo e Islam, 2022).

Plataformas como Amazon Web Services y Microsoft Azure proporcionan recursos computacionales elásticos para procesar instantáneamente conjuntos de datos a escala de terabytes. High-Performance Clusters y Graphics Processing Units reducen drásticamente los tiempos de entrenamiento para modelos de aprendizaje profundo, lo que facilita la optimización de los hiperparámetros y las simulaciones en conjuntos que antes no eran factibles (Mittal y Vaishay, 2019; Shuvo e Islam, 2022).

La contenedorización y los sistemas de gestión de flujos de trabajo estandarizan y automatizan la implementación del modelo para promover una experimentación más rápida y la reproducibilidad (Mittal y Vaishay, 2019; Shuvo e Islam, 2022). Para el análisis espacial, Google Earth Engine, ArcGIS y QGIS *plug-ins* se integran extensamente con bibliotecas de ML para acelerar el pipeline de ingestión y preprocesamiento de grandes conjuntos hidrológicos (Mittal y Vaishay, 2019; Shuvo e Islam, 2022). Estas herramientas facilitan las evaluaciones a múltiples escalas fusionando imágenes satelitales, imágenes satelitales, datos topográficos y productos de reanálisis climático.

La sinergia entre las plataformas geoespaciales y la computación en la nube permite continuidades minimizando manualidad que es crítica para pronósticos operativos o sistemas de monitoreo que requieren actualizaciones (Mittal y Vaishay, 2019; Shuvo e Islam, 2022). A pesar del *hardware* y del *software* avanzados, el preprocesamiento de datos sigue siendo un cuello de botella crítico. La heterogeneidad de las fuentes, como los resultados satelitales, *in situ* y modelos, a menudo resulta en discrepancias importantes en la resolución espacial, temporal y en los formatos de archivo (Mittal y Vaishay, 2019; Shuvo e Islam, 2022).

Mientras las técnicas como el escalado de características, reducción de dimensionalidad y la interpolación espaciotemporal se emplean rutinariamente, estos pueden imponer sumas de incertidumbre insatisfactorias (Mi-

ttal y Vaishay, 2019; Shuvo e Islam, 2022). Los controles de calidad, la detección de valores atípicos, corrección de errores del sensor, llenado de brechas, por ejemplo, puede consumir grandes recursos lo cual impulsa la demanda de conjuntos abiertos normalizados y algoritmos de limpieza automatizados (Mittal y Vaishay, 2019; Shuvo e Islam, 2022).

Habiendo abordado estos desafíos y maximizado el potencial de los entornos *big data*, el modelo se mantiene tal cual, y los métodos críticos siguen siendo utilizables en aplicaciones con alto costo de misión como la alerta temprana de inundaciones o administración de riesgo de sequía (Mittal y Vaishay, 2019; Shuvo e Islam, 2022).

Principales hallazgos en el desempeño y precisión predictiva

Previsión de inundaciones

La aplicación más importante del ML y la IA en hidrología es la previsión de inundaciones. La razón es que hacer un modelo predictivo preciso y atemporal puede reducir significativamente los daños a la propiedad y las muertes (Kumar et al., 2023; Li et al., 2024).

Las arquitecturas de datos como las LSTM, y CNN han demostrado una mejor captura de la dinámica compleja y no lineal de los eventos de inundación en comparación con los modelos hidrológicos tradicionales (Kumar et al., 2023; Li et al., 2024). Específicamente, los enfoques LSTM pueden capturar dependencias de largo alcance en los datos de lluvia y escorrentía, mejorando así los tiempos de entrega y la confiabilidad de los pronósticos de inundaciones repentinas e inundaciones fluviales (Kumar et al., 2023; Li et al., 2024).

Además, las técnicas de conjunto han funcionado bien en la manipulación de la entrada de datos de alta dimensión y reducción de la varianza predictiva (Kumar et al., 2023; Li et al., 2024). En estudios intercomprometidos, estos modelos de conjunto son lo suficientemente generales como para superar estadísticamente los modelos independientes y los modelos de redes neuronales simples en una variedad de regiones hidroclimáticas (Kumar et al., 2023; Li et al., 2024). La precisión mejorada se traduce en

alertas de inundaciones más rápidas, lo que da a las autoridades locales tiempo suficiente para comenzar a evacuar y restringir los recursos (Kumar et al., 2023; Li et al., 2024). Aunque estos son éxitos, hay algunas trampas, la generalización de un modelo en cuencas con datos limitados, sobrecarga de ajuste de hiperparámetros computacionales y dificultades de la caja negra son áreas activas en la investigación (Kumar et al., 2023; Li et al., 2024).

Sequía y gestión de los recursos hídricos

Además de las previsiones de inundaciones, los pronósticos de sequía han sido enormemente mejorados por las técnicas ML/IA avanzadas, particularmente en áreas donde la planificación a largo plazo del uso del agua es clave (Ahmed et al., 2024; Sundararajan et al., 2021).

Los modelos que usan análisis de series de tiempo, a menudo combinando datos de teledetección p.ej. Índices de vegetación de satélites con datos meteorológicos, pueden identificar precursores de déficit de lluvia, tensión en el sistema alimentario y agotamiento de los depósitos subterráneos (Ahmed et al., 2024; Sundararajan et al., 2021).

En este escenario, los métodos ML como la regresión de vectores de soporte y bosques aleatorios generalmente producen predicciones más precisas de los índices de sequía estandarizados que la regresión lineal o enfoques meramente físicos (Ahmed et al., 2024; Sundararajan et al., 2021).

Para el monitoreo de las aguas subterráneas, los investigadores han implementado modelos de aprendizaje profundo y de conjunto para prever los niveles del agua subterránea en una variedad de escenarios climáticos y de bombeo, lo que resulta en información sobre la tasa de extracción sostenible (Ahmed et al., 2024; Sundararajan et al., 2021).

Además, la combinación de modelos de aprendizaje automático con información hidrogeológica y *land-use* nuevos e incluso mejorados también mejora la identificación de los puntos flacos de la sobreexplotación, alimentando decisiones políticas y mecanismos de asignación de retorno (Ahmed et al., 2024; Sundararajan et al., 2021).

Sistemas de vigilancia en tiempo real y alerta temprana

Cada vez más publicaciones destacan el papel del monitoreo en tiempo real en el fortalecimiento de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) para inundaciones, sequía y otros desastres hidrológicos (Perera et al., 2019). La reciente aparición de los sensores de internet de las cosas (IdC) —midiendo las precipitaciones, la humedad del suelo, los niveles de agua y calidad del agua— permite una recopilación de datos continua y de alta frecuencia cuando se combinan con algoritmos de detección de anomalías, basado en aprendizaje automático plataformas DSS de SAT, pueden descubrir anomalías, como los rápidos aumentos en los niveles de agua o la repentina caída de humedad del suelo (Perera et al., 2019).

Destacan, además, la teledetección tecnologías, especialmente SAR y satélites ópticos, para un mapeo casi en tiempo real de la extensión de la inundación que se utiliza para asimilar la predicción del modelo de la inundación en conjuntos de datos y actualizaciones sobre un tiempo base dinámico (Schumann et al., 2023).

La asimilación dinámica de datos de sensores e imágenes de satélite ha reducido significativamente el tiempo de cero a una respuesta por agencias de gestión de desastres (Schumann et al., 2023). Existen también entornos de computación en la nube, la Tierra de Google (EE), AWS, que permiten una computación en tiempo real, oportunidades de revestimientos exactos para los terabytes de señales entrantes de alto flujo, la detección de escala, la medición satelital de inundaciones (Schumann et al., 2023).

Los cálculos y los primeros instantáneos, y la administración son de vital importancia para las alertas tempranas protocolos, especialmente en sincronía ha inundaciones inestables o acceso a rápidamente (Zulfaqar et al., 2024). El desafío actual para lanzar estas evaluaciones en tiempo real a gran escala efectiva siga siendo los costos de la infraestructura (Zulfaqar et al., 2024).

La fiabilidad de tiempo real SAT es redundancia de la red. Las protuberancias, las violaciones de los sensores o la comunicación han interrumpido los pronósticos actuales que los hacen confiables (Zulfaqar et al., 2024).

Tendencias emergentes, innovaciones y debates

Integración de datos en tiempo real e IoT

La convergencia de la red de sensores, los datos de teledetección y el análisis de inteligencia artificial ha surgido una nueva era de monitoreo hidrológico en tiempo real. Los dispositivos de internet de las cosas, que varían desde sensores terrestres que miden el nivel del agua y la humedad del suelo hasta generadores de imágenes basados en drones para evaluar las condiciones de las llanuras aluviales, producen datos de alta frecuencia a ser estudiados y visualizados en el momento (Rahman et al., 2023).

Esta amplia cantidad de información en tiempo real mejora la granularidad y la puntualidad de los conocimientos hidrológicos, permitiendo a las autoridades un *feedback* casi instantáneo de los cambios en su entorno ambiental (Rahman et al., 2023). En la práctica, varias plataformas basadas en la nube usan datos IoT combinados con datos de teledetección para disciplinar canales de aprendizaje automático para detectar inundaciones, evaluar sequías y prever flujos de ríos (Rahman et al., 2023).

La data en tiempo real combinada ayuda a detectar anomalías mediante métodos de aprendizaje automático de detección de anomalías, como aumentos repentinos en el nivel del agua o cambios abruptos en la profundidad del agua subterránea (Rao, 2022).

El resultado es un sistema de alerta temprana más dinámico y reactivo, el cual puede ajustar modelos predictivos en base a observaciones nuevas, reduciendo el riesgo a sorpresas catastróficas (Lakshmanna, 2022). Sin embargo, a pesar del atractivo de estos enfoques unificados, enfrentan barreras técnicas e institucionales, como la seguridad de la red, los acuerdos de “sharing” de datos y los altos costos de equipar infraestructuras extensivas de sensores (Lakshmanna, 2022).

IA explicable en hidrología

A medida que los modelos de aprendizaje automático se vuelven más complejos, las preguntas relacionadas con la aplicabilidad y la transparencia se han vuelto más prominentes (Asif, 2024).

Muchos modelos de aprendizaje profundo actuaban como “cajas negras” que ocultaban cómo los datos de entrada se traducían en resultados. Esta opacidad puede socavar la confianza, en el peor de los casos, disminuir su confianza en tales modelos (Asif, 2024).

En respuesta, ha surgido un interés creciente en los métodos de inteligencia artificial explicables dentro de la hidrología, como las métricas de importancia de características, el mapeo de saliencia, la propagación de relevancia por capas (LRP) y las explicaciones locales interpretables del modelo (Muhammad y Bendeche, 2024).

Estas técnicas buscan visualizar o cuantificar el impacto de las variables de entrada en las predicciones del modelo, aumentando la transparencia y, por ende, la confianza del usuario (Muhammad y Bendeche, 2024). En paralelo, ha habido desarrollos de modelos híbridos de *ever-ML-físicos*, que incorporan el conocimiento del dominio en marcos de inteligencia artificial para producir (Muhammad y Bendeche, 2024). Aunque sigue siendo un frente de investigación activo, estos enfoques explicables prometen equilibrar la capacidad predictiva con la necesaria responsabilidad requerida por *end-users* como los ingenieros y los legisladores (Muhammad y Bendeche, 2024).

Colaboración interdisciplinaria

La complejidad de la gestión de los recursos hídricos, en términos meteorológicos, ecológicos, sociales y económicos, necesita alianzas de cantarranas entre científicos informáticos, hidrólogos y reguladores políticos (Fu et al., 2024). Los consorcios de colaboración, como el Instituto Global para la Seguridad del Agua y HEPEX (Experimento de Predicción de Conjuntos Hidrológicos), ofrecen ejemplos de cómo la subsanación de las

divisiones disciplinares acelera la innovación y el despliegue operativo de IA en hidrología (Fu et al., 2024).

Los científicos informáticos aportan unos algoritmos de concepción, informática paralela y estructuras de datos, y los hidrólogos aportan su pericia específica del campo, garantizando que las encarnaciones del modelo comprendan los procesos físicos inherentes (Fu et al., 2024). En el ínterin, los administradores políticos y del agua aportan una perspectiva sobre las restricciones regulatorias y las probabilidades de adhesión pública, las cuales guían la evasión de los resultados de IA en medidas emprendedoras (Fu et al., 2024).

Se han hecho progresos significativos en la apertura de datos y repositorios compartidos los cuales permiten la colaboración en la investigación y la comparación de los modelos globales entre sí (Fu et al., 2024). Sin embargo, siguen existiendo preocupaciones por la financiación, las estructuras organizacionales y los silos disciplinarios (Fu et al., 2024).

Los investigadores y los profesionales subrayan la desesperación de la formación de más máquinas multidisciplinarios que combinen no sólo la ciencia medioambiental con la ciencia informática, sino también la investigación social y la supervisión ética (Fu et al., 2024).

La colaboración exhaustiva mejora las probabilidades de erradicar las reparaciones de IA desde los experimentos de práctica hasta la emulación generalizada, incrementando así el número de resistencia a los desafíos climatológicos del agua (Fu et al., 2024).

Análisis comparativo de estudios

Fortalezas y limitaciones

Una de tales fortalezas, pero no la última, es la heterogeneidad de los algoritmos empleados; desde modelos de ML poco profundos, como SVR y RF, hasta arquitecturas profundas, como LSTM, CNN y redes de transformadores, que han llevado a una fuerte predicción en los campos de la predicción de inundaciones y la evaluación de la sequía durante la última década (Fu et al., 2024).

Así, la adopción de paradigmas de *big data*, en términos de teledetección de alta resolución y IoT-sensores, subraya la ventaja competitiva de la IA hidrológica actual (Fu et al., 2024). Además, algunos grupos de investigación están demostrando marcos integrados o híbridos que mecánicamente incorporan restricciones físicas en los modelos de ML, lo que minimiza el peligro de correlaciones espurias y aumenta la interpretación de la salida (Fu et al., 2024).

Pero todas las esperanzas de revolución también se ven obstaculizadas en varios impedimentos. La calidad de las entradas aún es un impedimento mayor; la mayoría de las cuencas faltan registros a largo plazo y de alta frecuencia o pierden una breve cobertura de salida. Esto conduce a un sesgo de modelo para áreas bien instrumentadas (Fu et al., 2024).

El sobreajuste es un problema extra, ya que “los modelos, particularmente los modelos de *deep learning*, manifiestan un rendimiento excelente en los conjuntos de datos de formación, pero demuestran que no se puede generalizar para diferentes entornos” (Fu et al., 2024, p. 14507). Además, en entornos con recursos limitados, la intensidad computacional también puede ser un desafío, ya que el entrenamiento de modelos complejos y el manejo de grandes conjuntos de datos requieren una estructura informática significativa (Fu et al., 2024). Finalmente, sigue habiendo un debate abierto sobre la naturaleza de caja negra de muchos enfoques de IA de vanguardia, lo que impulsa la necesidad de soluciones de IA más robustas desde el punto de vista de la IA transparente (Fu et al., 2024).

Factores contextuales

Las condiciones geográficas, climáticas y socioeconómicas son críticas para la eficacia y la aplicabilidad de los modelos hidrológicos basados en datos, según Fu et al. (2024). Por ejemplo, para las regiones tropicales, “la alta variabilidad espaciotemporal de la precipitación, que en muchos casos sólo puede abordarse a través de redes de sensores de alta resolución o productos satelitales incluso para los algoritmos de aprendizaje automático más sofisticados” puede ser un desafío (Fu et al., 2024, p. 14515); mientras que las cuencas áridas y semiáridas pueden padecer escasez de

datos; por lo tanto: la calibración y validación de los modelos es más complicada incluso con la transferencia de aprendizaje o adaptación de dominio” (Fu et al., 2024, p. 14527).

Señalan Fu et al. (2024) que, además, las varias variables sociodemográficas también afectan la implementación de soluciones de IA. Por ejemplo, incluso si las alertas de inundaciones en tiempo real no tienen un efecto diferenciado, podría tener un éxito limitado en lugares con mecanismos de respuesta a emergencias subdesarrollados. Además, la aceptación cultural y social —o la percepción y la confianza por parte de los interesados— influye en la manera en que se implementan las soluciones de IA (Chiloane et al., 2022). Es más probable que los trabajos que incorporan los “conocimientos” tradicionales o que son apoyadas por la participación de la comunidad tengan niveles más altos de adopción de sistemas de predicción y planificación del agua (Chiloane et al., 2022). Estos matices contextuales enfatizan que, aunque los marcos de IA sean inevitablemente necesarios, las mejoras y la equidad en la gestión del agua se basarán en su adaptación a las condiciones hidrológicas y los antecedentes institucionales regionales (Chiloane et al., 2022).

Conclusión

La IA y el AA han cambiado radicalmente la forma en que los fenómenos hidrológicos se monitorean, modelan y predicen. Esta innovación se ha reflejado en la precisión mejorada de las predicciones de los algoritmos de AA superficial y las arquitecturas de aprendizaje profundo, como las LSTM y las CNN, especialmente para pronósticos no lineales y de alta dimensión.

Los sistemas de predicción en tiempo real de inundaciones y sequías y el monitoreo y la gestión de embalses se han visto notablemente mejorados, impulsados por la combinación con *big data*, la computación en la nube y las infraestructuras informáticas de alto rendimiento.

La oportuna toma de decisiones a través de sistemas y modelos de alerta temprana e integrados ha estado habilitada por estos avances para apoyar la reducción del riesgo de desastres y la gestión del agua. Los avances en el aprendizaje por transferencia, e IA por refuerzo, han coincidido

con la escasez de datos y la optimización de los sistemas de recursos hídricos. Las iniciativas de IA también han contribuido a marcos internacionales como el Marco de Sendai y el Objetivo de Desarrollo Sostenible 6, al aumentar la resiliencia a los desastres hidrológicos. Sin embargo, existen varios desafíos por abordar. En primer lugar, la fiabilidad de los modelos de IA se ve obstaculizada por desafíos en los datos, que incluyen la escasez, la inconsistencia, las principales restricciones de propiedad y las regiones en desarrollo. La segunda es la interpretación de modelos, en la cual muchos aprendizajes de IA de caja negra disminuyen la confiabilidad de sus usuarios. Aunque los marcos XAI y la combinación de elementos físicos y de IA se ven prometedores.

Otros desafíos incluyen la transferibilidad de AI a otras regiones debido al clima y las diferencias socioeconómicas y falta de validación a largo plazo en tiempo futuro. Se necesitan más colaboraciones entre disciplinas y entre personas para abordar estos problemas: acciones en profundidad para abordar los desafíos y la necesidad de un mayor desarrollo híbrido. Es menester también la continuidad de XAI para aplicaciones hidrológicas y otras herramientas de colaboración interdisciplinarias y protocolos unificados para actividades vinculantes mediante asociaciones e incentivos de financiación. Es fundamental integrar la IA con el marco de gestión para garantizar un esfuerzo sistémico y ético.

Referencias

- Ahmed, A. A., Sayed, S., Abdoulhalik, A., Moutari, S. y Oyedele, L. (2024). Applications of machine learning to water resources management: A review of present status and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 441, 140715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140715>
- Aldahlawi, R. Y., Akbari, V. y Lawson, G. (2024). A systematic review of methodologies for human behavior modelling and routing optimization in large-scale evacuation planning. *Journal of Cleaner Production*, 110, 104638. <https://doi.org/10.1016/j.jij-drr.2024.104638>
- Asif, M. (2024). *Deep learning: Unraveling the black box of neural networks* (Preprint 12535). EasyChair.
- Chatrabhuj, Meshram, K., Mishra, U. y Omar, P. J. (2024). Integration of remote sensing

- data and GIS technologies in river management system. *Discover Geoscience*, 2(1), 67. <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00080-8>
- Chang, F. J., Chang, L. C. y Chen, J. F. (2023). Artificial intelligence techniques in hydrology and water resources management. *Water*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/w15101846>
- Chiloane, C., Dube, T. y Shoko, C. (2022). Impacts of groundwater and climate variability on terrestrial groundwater dependent ecosystems: A review of geospatial assessment approaches and challenges and possible future research directions. *Geocarto International*, 37(23), 6755-6779. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1948108>
- Chitwatkulsiri, D. y Miyamoto, H. (2023). Real-time urban flood forecasting systems for Southeast Asia: A review of present modelling and its future prospects. *Water*, 15(1), 178. <https://doi.org/10.3390/w15010178>
- Fu, X., Jiang, J., Wu, X., Huang, L., Han, R., Li, K., ... y Wang, Z. (2024). Deep learning in water protection of resources, environment, and ecology: Achievement and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(10), 14503-14536. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31963-5>
- Guan, C., Mou, J. y Jiang, Z. (2020). Artificial intelligence innovation in education: A twenty-year data-driven historical analysis. *International Journal of Innovation Studies*, 4(4), 134-147. <https://doi.org/10.1016/j.ijis.2020.09.001>
- Hassija, V., Chamola, V., Mahapatra, A., Singal, A., Goel, D., Huang, K., ... y Hussain, A. (2024). Interpreting black-box models: A review on explainable artificial intelligence. *Cognitive Computation*, 16(1), 45-74. <https://doi.org/10.1007/s12559-023-10179-8>
- Ibrahim, K. S. M. H., Huang, Y. F., Ahmed, A. N., Koo, C. H. y El-Shafie, A. (2022). A review of the hybrid artificial intelligence and optimization modelling of hydrological streamflow forecasting. *Alexandria Engineering Journal*, 61(1), 279-303. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.100>
- Ivanovs, M., Kadikis, R. y Ozols, K. (2021). Perturbation-based methods for explaining deep neural networks: A survey. *Pattern Recognition Letters*, 150, 228-234. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2021.06.030>
- Kamyab, H., Khademi, T., Chelliapan, S., Saberikamarposhti, M., Rezaia, S. yusuf, M., ... y Ahn, Y. (2023). The latest innovative avenues for the utilization of artificial intelligence and big data analytics in water resource management. *Results in Engineering*, 20, 101566. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101566>
- Kebede, E. A., Abou Ali, H., Clavelle, T., Froehlich, H. E., Gephart, J. A., Hartman, S., ... y Davis, K. F. (2024). Assessing and addressing the global state of food production data scarcity. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(4), 295-311. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00516-2>
- Khan, A. A. y Zakarya, M. (2021). Energy, performance and cost-efficient cloud data centers: A survey. *Computer Science Review*, 40, 100390. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100390>
- Kim, T. yang, T., Gao, S., Zhang, L., Ding, Z., Wen, X., ... y Hong, Y. (2021). Can artificial intelligence and data-driven machine learning models match or even replace pro-

- cess-driven hydrologic models for streamflow simulation?: A case study of four watersheds with different hydro-climatic regions across the CONUS. *Journal of Hydrology*, 598, 126423. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126423>
- Kouraytem, N., Li, X., Tan, W., Kappes, B. y Spear, A. D. (2021). Modeling process-structure-property relationships in metal additive manufacturing: A review on physics-driven versus data-driven approaches. *Journal of Physics: Materials*, 4(3), 032002. <https://doi.org/10.1088/2515-7639/abca7b>
- Kumar, V., Azamathulla, H. M., Sharma, K. V., Mehta, D. J. y Maharaj, K. T. (2023). The state of the art in deep learning applications, challenges, and future prospects: A comprehensive review of flood forecasting and management. *Sustainability*, 15(13), 10543. <https://doi.org/10.3390/su151310543>
- Lakshmana, K., Kaluri, R., Gundluru, N., Alzamil, Z. S., Rajput, D. S., Khan, A. A., ... y Alhussen, A. (2022). A review on deep learning techniques for IoT data. *Electronics*, 11(10), 1604. <https://doi.org/10.3390/electronics11101604>
- Lee, G. Y., Dam, T., Ferdaus, M. M., Poenar, D. P. y Duong, V. N. (2024). Unlocking the capabilities of explainable few-shot learning in remote sensing. *Artificial Intelligence Review*, 57(7), 169. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10803-5>
- Li, H., Zhu, M., Li, F. y Skitmore, M. (2024). Solving flood problems with deep learning technology: Research status, strategies, and future directions. *Sustainable Development*, 32(6), 7011-7035. <https://doi.org/10.1002/sd.3074>
- Manzoor, Z., Ehsan, M., Khan, M. B., Manzoor, A., Akhter, M. M., Sohail, M. T., ... y Abioui, M. (2022). Floods and flood management and its socio-economic impact on Pakistan: A review of the empirical literature. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1021862. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1021862>
- Mishra, B., Dahal, A., Luintel, N., Shahi, T. B., Panthi, S., Pariyar, S. y Ghimire, B. R. (2022). Methods in the spatial deep learning: Current status and future direction. *Spatial Information Research*, 30(2), 215-232. <https://doi.org/10.1007/s41324-021-00425-2>
- Mishra, B. K., Kumar, P., Saraswat, C., Chakraborty, S. y Gautam, A. (2021). Water security in a changing environment: Concept, challenges and solutions. *Water*, 13(4), 490. <https://doi.org/10.3390/w13040490>
- Mittal, S. y Vaishay, S. (2019). A survey of techniques for optimizing deep learning on GPUs. *Journal of Systems Architecture*, 99, 101635. <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2019.101635>
- Muhammad, D. y Bendeche, M. (2024). Unveiling the black box: A systematic review of explainable artificial intelligence in medical image analysis. *Computational and Structural Biotechnology Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2024.08.005>
- Nascimento, R. G., Fricke, K. y Viana, F. A. (2020). A tutorial on solving ordinary differential equations using Python and hybrid physics-informed neural network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 96, 103996. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103996>
- Perera, D., Seidou, O., Agnihotri, J., Rasmy, M., Smakhtin, V., Coulibaly, P. y Mehmood, H. (2019). Flood early warning systems: A review of benefits, challenges, and prospects. UNU-INWEH.

- Rai, H. M., Yoo, J. y Razaque, A. (2024). Comparative analysis of machine learning and deep learning models for improved cancer detection: A comprehensive review of recent advancements in diagnostic techniques. *Expert Systems with Applications*, 255, 124838. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124838>
- Rahman, M. S., Ghosh, T., Aurna, N. F., Kaiser, M. S., Anannya, M. y Hosen, A. S. (2023). Machine learning and Internet of Things in Industry 4.0: A review. *Measurement: Sensors*, 28, 100822. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100822>
- Rao, A. S., Radanovic, M., Liu, Y., Hu, S., Fang, Y., Khoshelham, K., ... y Ngo, T. (2022). Real-time monitoring of construction sites: Sensors, methods, and applications. *Automation in Construction*, 136, 104099. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104099>
- Reed, D., Gannon, D. y Dongarra, J. (2022). Reinventing high performance computing: Challenges and opportunities. *arXiv*, 2203.02544. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.02544>
- Sen, Z. (2021). Reservoirs for water supply under climate change impact: A review. *Water Resources Management*, 35(11), 3827-3843. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02925-0>
- Shen, C., Appling, A. P., Gentine, P., Bandai, T., Gupta, H., Tartakovsky, A., ... y Lawson, K. (2023). Differentiable modelling to unify machine learning and physical models for geosciences. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(8), 552-567. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00450-9>
- Schumann, G., Giustarini, L., Tarpanelli, A., Jarihani, B. y Martinis, S. (2023). Flood modeling and prediction using earth observation data. *Surveys in Geophysics*, 44(5), 1553-1578. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09751-y>
- Shuvo, M. M. H., Islam, S. K., Cheng, J. y Morshed, B. I. (2022). Efficient acceleration of deep learning inference on resource-constrained edge devices: A review. *Proceedings of the IEEE*, 111(1), 42-91. <https://doi.org/10.1109/jproc.2022.3226481>
- Singh, S., Mishra, K., Chavan, R. y Tiwari, H. L. (2023, December). Advancements and challenges in hydrological modeling: A comprehensive review. In *International Conference on Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering* (pp. 423-442). Springer Nature Singapore.
- Soares, L. M. V. y Do Carmo Calijuri, M. (2021). Deterministic modelling of freshwater lakes and reservoirs: Current trends and recent progress. *Environmental Modelling & Software*, 144, 105143. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105143>
- Sundararajan, K., Garg, L. y Srinivasan, K. (2021). A contemporary review on drought modeling using machine learning approaches. *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 128(2), 1-4. <https://doi.org/10.32604/cmcs.2021.015528>
- Yang, D. yang, Y. y Xia, J. (2021). Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geography and Sustainability*, 2(2), 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>
- Wang, J., Li, Y., Gao, R. X. y Zhang, F. (2022). Hybrid physics-based and data-driven models for smart manufacturing: Modelling, simulation, and explainability. *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 381-391. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.004>

- Xiong, J. y Yang, Y. (2024). Climate change and hydrological extremes. *Current Climate Change Reports*, 11(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s40641-024-00198-4>
- Yaseen, Z. M. (2023). A new benchmark on machine learning methodologies for hydrological processes modelling: A comprehensive review for limitations and future research directions. *Knowledge-Based Engineering and Sciences*, 4(3), 65-103. <https://doi.org/10.51526/kbes.2023.4.3.65-103>
- Zulfaqar, S. A., Ramli, M. W. A., Tajuddin, W. A. N. W. A., Arman, N. Z., Hassan, C. H. C., Ramzan, M. A., ... y Alias, N. E. (2024). Evaluating flood early warning system and public preparedness and knowledge in urban and semi-urban areas of Johor, Malaysia: Challenges and opportunities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 104870. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104870>

6. La electromovilidad en México, una estrategia de transición energética hacia una industria de movilidad verde



ÁNGEL DE JESÚS MC NAMARA VALDÉS*

ANDREA ALEJANDRA RENDÓN PEÑA**

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.06>

Resumen

México enfrenta el desafío global de la transición energética, la adopción de energías alternativas se vuelve ahora una de las tareas prioritarias, no solamente para satisfacer la demanda energética, sino también para el sector movilidad y transporte que pueda funcionar con vehículos eléctricos y se construya una industria de movilidad más sustentable. La electromovilidad emerge como una estrategia central en este proceso, ofreciendo la oportunidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles, disminuir las emisiones contaminantes en los centros urbanos y fomentar el desarrollo de una industria verde nacional. El objetivo de este trabajo es explorar el panorama actual de la electromovilidad en México por medio del análisis del potencial para impulsar la transición en términos de marco legal, infraestructura y preferencia por utilizar vehículos eléctricos. La metodología utilizada para este trabajo fue del tipo mixta, examinando aspectos cuantitativos en términos de puntos de carga, vehículos eléctricos en circulación en México y el consumo energético nacional, también aspectos cualitativos

* Doctorado en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8640-9741> ; correo electrónico: amcnamarav@ipn.mx

** Maestra en Ciencias Fisicomatemáticas. Directora de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Energía y Movilidad del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8326-8341>

como la percepción de la movilidad eléctrica y las tendencias de movilidad de las personas y las mercancías. Los resultados muestran que la adopción de vehículos eléctricos en México va en aumento y que el desarrollo de la infraestructura de carga tiene diversas áreas de oportunidad, lo que ocasiona una percepción social dividida sobre la electromovilidad como estrategia de industria verde para la movilidad.

Palabras clave: *electromovilidad, industria verde, transición energética, percepción.*

Introducción

En los últimos tiempos en este siglo XXI, la humanidad está viviendo una era de desafíos ambientales más complejos nunca vistos, marcada por la creciente conciencia de que el modelo de desarrollo predominante ha alcanzado sus límites ecológicos (Echavarría et al., 2023). La crisis climática, la pérdida acelerada de biodiversidad y la contaminación generalizada son síntomas de un sistema económico que durante siglos ha priorizado el crecimiento a corto plazo sobre la sustentabilidad a largo plazo (Flores et al., 2023; Solís, 2025). Es en este contexto, donde la necesidad de la transición energética global comienza a resonar en todos los sectores, desde los gobiernos y las empresas hasta la sociedad civil, teniendo en cuenta que no se trata solamente de un cambio en términos tecnológicos sino de una transformación integral y de estructura que exige el cambio de paradigmas en términos políticos, sociales, económicos y ambientales.

La herencia de los combustibles fósiles

De acuerdo con Soeder (2025), la dependencia histórica de los combustibles fósiles, carbón, petróleo y gas natural ha sido el pilar del desarrollo industrial desde la Revolución Industrial del siglo XVIII. Estos recursos permitieron el impulso de las economías mediante la fuerza de la maquinaria que permitió llevar a cabo los procesos de producción de una manera más rápida,

esto trajo consigo empleo y avances tecnológicos en paralelo, a medida que se expandía su uso; sin embargo, su explotación masiva ha generado externalidades negativas que trascienden las fronteras nacionales, afectando tanto a países desarrollados como a aquellos en vías de desarrollo (Gandomi et al., 2024). Dentro de las consecuencias más graves se encuentran: el cambio climático, donde el papel de los combustibles fósiles ha sido generar emisiones que encapsulan los rayos del sol que impactan la Tierra provocando el aumento de la temperatura general, esto ha provocado fenómenos meteorológicos extremos, como huracanes, sequías e inundaciones, que amenazan la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia de millones de personas. De acuerdo con Miyazaki y Bowman (2023), la degradación de la calidad del aire es uno de los efectos devastadores, las ciudades industrializadas enfrentan crisis recurrentes de smog, con graves repercusiones en la salud pública. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación atmosférica causa más de 7 millones de muertes prematuras al año. Otra de las consecuencias es la inestabilidad e inseguridad energética entre naciones, la geopolítica de los combustibles fósiles ha generado conflictos por el control de recursos, dependencia económica de países exportadores y volatilidad en los precios; uno de los ejemplos más recientes es la crisis energética del año 2022 tras la invasión de Rusia a Ucrania.

La importancia de la transición energética

De acuerdo con Juárez (2023), la adopción de fuentes de energía alternativas como la solar, eólica, hidrógeno verde y biomasa se ha convertido en una prioridad ineludible. Sin embargo, la transición no se limita a reemplazar una fuente de energía por otra; implica una reconfiguración integral de los sistemas productivos y de consumo. Esto se debe a dos principales características de las energías antes mencionadas, su intermitencia y el gran reto del almacenamiento de energía. Dentro de los ejes de la transición energética se encuentran la innovación tecnológica como desarrollo de avances en almacenamiento de energía baterías de litio o de hidrógeno redes inteligentes y eficiencia energética están permitiendo una integración más estable de

renovables en la matriz energética. Política pública sólida y ambiciosa como el Pacto Verde Europeo y la Ley de Reducción de la Inflación (IRA) en Estados Unidos están impulsando inversiones billonarias en infraestructura sustentable, considerando que los impuestos al carbono y los subsidios a energías limpias son herramientas cada vez más utilizadas (Ullah et al., 2024), y no menos importante, pero fundamental, el cambio cultural y empresarial: cada vez se tienen consumidores más demandantes de productos y servicios sustentables que utilicen modelos circulares y compromisos de reducción de emisiones netas o Net Zero (Wahlund y Palm, 2022).

Situación en México

México, como actor relevante en el escenario global por su posición geopolítica, su economía emergente y su riqueza en recursos naturales, no es ajeno a la coyuntura crítica que define al siglo XXI en materia energética y ambiental. De acuerdo con Straffon, Ferrari y Masera (2024), el país enfrenta un doble desafío estructural: por un lado, debe satisfacer una demanda energética en constante crecimiento, impulsada por su desarrollo económico, la expansión demográfica con más de 130 millones de habitantes y un proceso de urbanización acelerado y, por otro, está obligado a mitigar su contribución a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), las cuales representaron en 2019: 736.63 millones de toneladas aproximadamente el 1.3% del total mundial, según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Esta dualidad expone tensiones profundas entre el modelo tradicional basado en hidrocarburos con Pemex como eje histórico y los compromisos internacionales adquiridos bajo el Acuerdo de París, que exigen reducir un 22% las emisiones de GEI para 2030.

De acuerdo con Reyes, Reyes y Turrubiarres (2024), en México ocurre uno de los fenómenos más interesantes en materia energética, una paradoja que deja ver la rivalidad entre recursos naturales y dependencia externa. México es un país con un potencial enorme en energías renovables: cuenta con una de las radiaciones solares más altas del mundo, especialmente en el norte y centro, corredores eólicos excepcionales como el Istmo de Tehuantepec y recursos geotérmicos, siendo el cuarto productor global; sin

embargo, su matriz energética sigue dominada por los combustibles fósiles, que aportan cerca del 80% de la energía primaria, según la Secretaría de Energía (Sener). Esta dependencia tiene consecuencias críticas entre las que se encuentra la vulnerabilidad económica, ya que a pesar de ser productor de petróleo, México importa más del 60% de la gasolina y el diésel que consume, debido a la obsolescencia de sus refinerías. Esto genera una factura millonaria en divisas y exposición a volatilidad de precios. En cuanto al impacto ambiental, el sector energético es responsable del 25% de las emisiones nacionales de GEI, con centrales termoeléctricas y flotas vehiculares obsoletas como principales áreas de oportunidad.

La movilidad como oportunidad

Siguiendo a Alves y Odriozola (2024), el sector del transporte y de la movilidad en general emerge como un contribuyente clave a la contaminación y la ineficiencia, uno de los principales puntos es la contaminación en espacios urbanos por medio del parque vehicular en México el cual cuenta con más de 50 millones de unidades, de las cuales el 70% de ellas tienen más de 10 años de antigüedad, por lo cual es una de las principales fuentes de emisiones en entidades como la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara (Toledo, 2023; Barbosa, 2023). Estas metrópolis figuran recurrentemente en *rankings* de mala calidad del aire, vinculada a 17 000 muertes prematuras anuales INECC. De acuerdo con Rocha y otros (2024), la dependencia tecnológica es pieza clave; menos del 1% de los vehículos en circulación son eléctricos o híbridos, muy por debajo de la media global, debido a barreras como altos costos, falta de infraestructura de carga, ya que sólo hay alrededor de 1 200 electrolineras en todo el país, y políticas públicas inconsistentes, que no favorecen el consumo de tecnología y dejan al consumidor vulnerable. Pieza clave de la movilidad, el transporte público, sistemas masivos como el Sistema de Transporte Colectivo (Metro) de la Ciudad de México o los autobuses urbanos operan con tecnologías obsoletas, mientras el transporte de carga depende en un 90% del diésel, un combustible altamente contaminante y causante de muchas externalidades negativas a la salud humana.

Pero en esa búsqueda de la transición energética hacia un sistema de movilidad sustentable, el enfoque no solamente puede ser ambiental, sino también una oportunidad social y económica, atendiendo así las demandas sociales que habían quedado olvidadas durante años (Del Río et al., 2023; Pallonetto, 2023).

Dentro de esa búsqueda de la transformación se encuentra la iniciativa pública, por ejemplo, el Programa de Electromovilidad que la Sener y la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) han desarrollado en la búsqueda de que el parque vehicular pueda reducir sus emisiones de GEI y se utilicen en su mayoría los medios de movilidad eléctrica existentes. En términos de proyectos de movilidad eléctrica, en la Ciudad de México han surgido proyectos como las tres líneas de Cablebús, un sistema de teleféricos utilizados para el transporte público de personas que operan en zonas de difícil acceso con energía eléctrica, un avance tecnológico bastante adecuado para el contexto mexicano, además de sistemas como el trolebús que prestan servicio de transporte con autobuses 100% eléctricos (Nochebuena et al., 2023).

En la iniciativa privada es posible encontrar empresas mexicanas como Zacua (2025), una empresa mexicana comprometida con el ambiente y la sustentabilidad. “En Zacua creemos y confiamos en el planteamiento de una mejor movilidad urbana, que tenga menor impacto ambiental. También creemos en el compromiso de un mejor futuro para todos, apoyando la transición de México hacia industrias más verdes”, por mencionar un ejemplo.

Desarrollo

Para la exploración del panorama actual de la electromovilidad en México se tomaron diversos elementos de análisis como la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (ENME) en la cual se establece la electromovilidad como una alternativa de transporte para el gran desafío de desplazamiento en las ciudades. Es un término que ha sido adoptado para referirse a los vehículos que utilizan de manera total o parcial sistemas de propulsión eléctrica, los vehículos pueden ser desde bicicletas y motocicletas, hasta trenes y aviones.

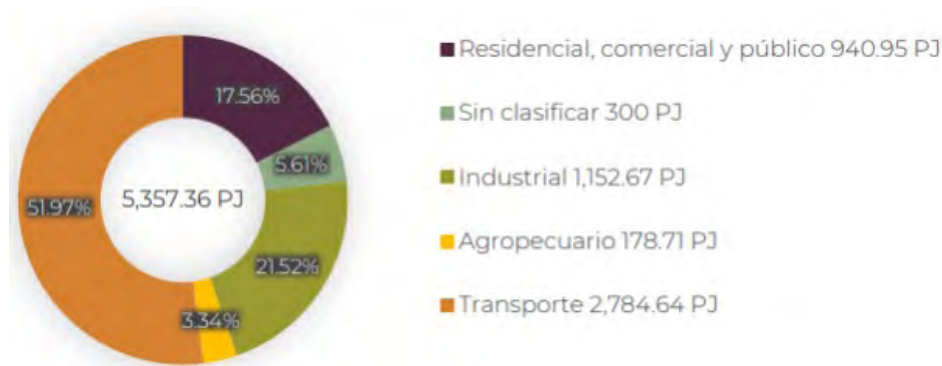
En la ENME señalan que México podría mejorar sustancialmente la calidad del aire y su eficiencia energética mediante la electrificación del transporte. Los autos eléctricos, al no utilizar combustibles contaminantes y operar con sistemas de alto rendimiento, ofrecen una alternativa limpia y tecnológicamente superior a los vehículos tradicionales. De acuerdo con Sandoval (2023), los motores de gasolina tradicionales presentan una eficiencia energética limitada, donde apenas el 25% de la energía del combustible se transforma en movimiento mecánico para las ruedas; el 75% restante se pierde principalmente como calor residual y energía disipada por fricción interna en los componentes del motor, a diferencia de un motor eléctrico el cual contiene menor cantidad de piezas móviles y que tampoco utiliza fluidos para su funcionamiento (Martínez y Gassinski, 2022). Es en este caso en el cual la combinación de ambas metodologías de propulsión puede utilizarse para llegar a un punto de mayor eficiencia, los vehículos con sistemas de propulsión eléctrica logran una mejora sustancial en eficiencia energética. Un automóvil híbrido, que combina un motor de combustión interna alimentado por hidrocarburos, con un motor eléctrico impulsado por baterías, puede incrementar su rendimiento energético en al menos un 30% gracias a la implementación de tecnologías de recuperación de energía, como los sistemas de frenado regenerativo.

Dentro de este mundo de los vehículos híbridos destacan los vehículos híbridos enchufables, que se caracterizan por recargar sus baterías en estaciones especializadas mediante conexión directa a la red eléctrica. Estos modelos incorporan paquetes de baterías de alta capacidad que les permiten operar exclusivamente en modo eléctrico, logrando incrementar su eficiencia energética entre un 31 y un 49% respecto a vehículos convencionales (Zhang y Ma, 2022). Los automóviles 100% eléctricos operan exclusivamente con un sistema de propulsión eléctrica y paquetes de baterías de gran capacidad. Estos vehículos se recargan mediante conexión directa a estaciones especializadas, logrando una notable eficiencia energética, del 77% en la conversión de energía eléctrica a movimiento (Yadlapalli, 2022).

De acuerdo con la CONUEE, en 2021, el consumo de combustibles en el sector de transporte nacional totalizó 2 784.644 petajulios (PJ), lo cual fue 63.45% mayor que en el año 2020; esto representó 51.98% del consumo total de energía en el país. Esto puede ser analizado desde el punto de vista

de la pandemia, en 2020, las recomendaciones en México fueron no salir de casa, por lo que se puede leer un aumento significativo en el consumo de combustible. De los 2 784.644 PJ utilizados en este sector, apenas 5 693 PJ provinieron de electricidad para vehículos eléctricos, lo que equivale a un mínimo 0.2% de participación en la matriz energética del transporte. Según datos de World Energy Balances (IEA), en 2022 el sector transporte representó aproximadamente el 38.87% del consumo energético global. A continuación, en la figura 6.1 se muestra el consumo de energía final por sector en México en el año 2021.

Figura 6.1. Consumo final energético por sector



Fuente: Sener-CONUEE.

Para la fracción de esa porción que utiliza el transporte es posible analizarla desde cada uno de los porcentajes de los energéticos utilizados. En la figura 6.2 se muestra el porcentaje de consumo energético del transporte por cada energético.

Figura 6.2. Porcentaje de consumo energético del transporte



Fuente: Sener-CONUEE.

De dicha gráfica se puede interpretar que existe dominio de combustibles fósiles, la gasolina, con 66.93% y el diésel, 25.7% lideran el consumo, reflejando la dependencia actual de los vehículos convencionales, también revelan que existe baja participación de energías limpias, pues la electricidad representa solo 0.2%, confirmando lo marginal de la movilidad eléctrica en el mix energético global del transporte.

En términos del parque vehicular en México, es punto clave la transformación y adquisición de vehículos eléctricos. De acuerdo con la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz, A. C. Entre enero de 2020 y diciembre de 2022, se comercializaron un total de 122 549 autos híbridos y eléctricos en México. Las ventas se concentraron principalmente en diez entidades: Ciudad de México, Estado de México, Nuevo León, Jalisco, Puebla, Guanajuato, Sinaloa, Michoacán, Veracruz y Coahuila. Sin embargo, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (INEGI), para comienzos de este 2025, se han registrado caídas importantes en las ventas de autos eléctricos, para el primer trimestre de 2025, las ventas cayeron 15.4%; en marzo, sólo se comercializaron 1 655 vehículos, al igual que en febrero cayeron 13.21%, con solamente 1 307 unidades vendidas, el nivel más bajo desde octubre de 2023.

Esta caída se produce después de un cierre de 2024 que ya reflejaba una desaceleración, en medio de un declive generalizado en la demanda de vehículos eléctricos. Según datos de Tata Consultancy Services, el 54% de los fabricantes de automóviles reportan una disminución en las ventas, y el 25% anticipa que esta baja persistirá durante al menos los próximos dos años.

En el segmento de vehículos híbridos, las ventas también muestran una ralentización. Durante marzo, se comercializaron 9 742 unidades, lo cual representa un aumento anual de 39.71%, cifra inferior al crecimiento del 68.02% registrado en diciembre de 2024, mes en que se vendieron 12 289 unidades, marcando un récord. Por otro lado, los híbridos enchufables experimentaron un repunte, con 828 unidades vendidas en marzo, un 94.37% más que el año anterior y un total de 2 533 unidades en el trimestre. De acuerdo con la Asociación Electro Movilidad (EMA), este subsector cerró el primer trimestre con 11 192 unidades, destacando el impulso de Build Your Dreams (BYD), cuya demanda creció un 514.2% frente al mismo periodo del año pasado.

Uno de los principales desafíos para la adopción de vehículos eléctricos en México es la infraestructura de recarga. Aunque el país cuenta con 3 514 estaciones públicas y 43 942 puntos privados (según el Oxford Institute for Energy Studies), la penetración de estos autos sigue siendo baja debido a su alto costo y su limitada presencia en el mercado. No obstante, se han logrado avances significativos gracias a la colaboración entre la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y empresas privadas, alcanzando más de 2 000 estaciones de carga para finales de 2022. Entre las opciones disponibles destacan redes exclusivas como Tesla y sistemas públicos como ChargeNow (desarrollado en alianza con CFE, BMW y Nissan). Además, existe un corredor de carga rápida de 430 km que conecta San Luis Potosí, Ciudad de México y Puebla.

Los incentivos gubernamentales son otro pilar clave para impulsar esta transición. A nivel nacional, se ofrecen beneficios como:

- Exención del ISAN (impuesto federal sobre autos nuevos).
- Deducciones del ISR por depreciación de vehículos eléctricos y hasta 25% por inversiones en bicicletas o motocicletas eléctricas.

- Descuentos en casetas de peaje (CDMX y Edomex) y exención de tenencia por 5 años (con 50% de descuento los siguientes 5).
- Instalación gratuita de medidores para cargadores domésticos por parte de la CFE.
- Exclusión del programa hoy no circula y exención de verificación vehicular en la ZMVM.
- Exención de aranceles para vehículos pesados eléctricos.

Adicionalmente, la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (ENME) establece metas ambiciosas: para 2030, las diez ciudades más contaminantes del país deberán integrar transporte público eléctrico, incentivando también la fabricación local de vehículos híbridos y eléctricos. Paralelamente, se están reforzando los estándares de eficiencia energética para vehículos ligeros y de carga, con el fin de reducir emisiones y acelerar la transición hacia tecnologías más limpias.

Uno de los aspectos clave para la transición hacia la movilidad eléctrica es la percepción pública sobre esta tecnología. Para abordarlo, se ha implementado una estrategia de educación dirigida a los consumidores, con el objetivo de informarles sobre las características técnicas, las ventajas de los vehículos eléctricos y los incentivos disponibles. Por ello, la industria automotriz en México ha asumido el compromiso de difundir este conocimiento mediante alianzas con instituciones gubernamentales y académicas. Estas colaboraciones incluyen la organización de eventos educativos, como foros, seminarios y conferencias, para promover la movilidad sustentable. Además, se llevan a cabo campañas de concientización que resaltan los beneficios de los vehículos electrificados, junto con información sobre programas de incentivos y opciones de financiamiento. Igua de relevante es la incorporación de contenidos sobre electrificación vehicular en los planes de estudio de carreras técnicas e ingenierías, en coordinación con centros educativos.

La adopción de la electromovilidad en México requiere una estrategia gubernamental integral. Esto implica, en primer lugar, establecer un marco regulatorio que impulse y regule las innovaciones tecnológicas en el sector. Además, es necesario implementar incentivos fiscales y no fiscales para motivar la compra de vehículos híbridos y eléctricos. Otro factor determinante es la ampliación de la infraestructura de carga en todo el país, aseguran-

do su disponibilidad. Asimismo, es fundamental garantizar el acceso a energías renovables a precios competitivos, lo que no sólo minimiza el impacto ambiental del transporte eléctrico, sino que también atrae inversiones en proyectos sostenibles. Sólo mediante la combinación de estas medidas legales, económicas, técnicas y ambientales se podrá lograr una transición efectiva hacia sistemas de movilidad más eficientes y menos contaminantes.

Grupos de trabajo para la adopción de la electromovilidad en México

La Alianza por la Electromovilidad en México es una iniciativa colaborativa creada para acelerar la implementación de tecnologías de movilidad eléctrica en el territorio nacional. Su objetivo principal es desarrollar propuestas estratégicas que faciliten soluciones holísticas para la transición energética, abarcando todos los eslabones de la cadena de valor. Los colaboradores de la Alianza son los siguientes:

- Secretaría de Energía
- Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México
- Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- Asociación Mexicana de la Industria Automotriz
- Copper Alliance
- Cámara Nacional de Manufacturas Eléctricas

Esta alianza busca una visión 2022, la cual en términos generales tiene el enfoque en el transporte público, las electrolinerías, las ventas de vehículos eléctricos e influenciar en las decisiones públicas en términos de electromovilidad. La electrificación del transporte público es una de las acciones más importantes para reducir las emisiones contaminantes, la adopción de transporte eléctrico mejora la eficiencia energética gracias a sus motores eléctricos. Aunque incrementará la demanda de electricidad, México cuenta con objetivos claros para aumentar progresivamente la participación de

energías renovables en su matriz energética. Esto permitirá compensar el mayor consumo eléctrico mientras se reducen las emisiones contaminantes asociadas a la generación basada en combustibles fósiles. Por ejemplo, La Ciudad de México cuenta con una larga trayectoria en transporte público eléctrico, iniciando con los tranvías y evolucionando hacia los trolebuses y teleféricos que hoy continúan operando y modernizándose. Este compromiso con la movilidad sustentable se refleja también en el Metrobús, cuya línea 3 se ha convertido en 100% eléctrica, reduciendo entre un 80 y 84% las emisiones contaminantes generadas por esta ruta. La red de transporte ferroviario de la capital incluye diversos sistemas masivos como el metro, tren suburbano y tren ligero. Como complemento a esta infraestructura, se han implementado conexiones innovadoras como el Cablebús, diseñado para vincular estaciones del metro con áreas periféricas de la Ciudad y el Estado de México, optimizando significativamente los tiempos de viaje de los habitantes de la zona metropolitana.

En la actualidad, la iniciativa privada y pública han tomado acciones para desarrollar proyectos que contribuyan a la electromovilidad en México. En la Ciudad de México en particular, el Servicio de Transportes Eléctricos (STE), está modernizando su flota con 413 trolebuses nuevos de las marcas Yutong y Zhongtong, adquiridos hasta diciembre de 2023, con el objetivo de alcanzar las 500 unidades para finales de 2024. Esta iniciativa, enmarcada en el Programa Integral de Movilidad capitalino, cuenta principalmente con financiamiento público, aunque incluye esquemas de colaboración privada mediante subsidios para la adquisición de unidades en ciertas rutas. El sistema Metrobús ha implementado flotas 100% eléctricas en sus líneas 3 y 4, utilizando autobuses articulados. La línea 3 fue pionera en esta transición completa a energía eléctrica, seguida posteriormente por la línea 4. Estos corredores sirven como modelos demostrativos para el resto de la red, ya que cada uno ha adoptado esquemas de financiamiento y configuraciones vehiculares adaptadas a sus requerimientos específicos. Los teleféricos, por ejemplo, ahora prestan servicio de transporte público en la Ciudad de México, se cuenta a la fecha con tres líneas con una extensión total de 24.75 km y 19 estaciones en su conjunto.

El sistema IETram de Mérida opera con 32 unidades eléctricas de marca Irizar distribuidas en cinco corredores, integrando más de 100 rutas de

transporte público. El proyecto requirió una inversión de 2 820 millones de pesos, con recursos combinados del gobierno estatal, federal y capital privado. La infraestructura de carga se financió mediante el Protram en colaboración con el gobierno yucateco.

El sistema MiTransporte Eléctrico de Guadalajara despliega 38 unidades Sunwin de 8.6 metros con autonomía de 200-250 km, atendiendo rutas estratégicas como la conexión aeroportuaria. Implementado desde 2021, completó al 100% sus objetivos, incluyendo infraestructura crítica, es decir, subestación y 19 cargadores. Su modelo innovador divide responsabilidades: Motbus como arrendador de flota, mientras gobierno/SITEUR administran operaciones y mantenimiento.

El más actual de los proyectos de movilidad, el auto Olinia, se trata de mini vehículos eléctricos 100% mexicanos diseñados para atender las necesidades de movilidad personal, de movilidad de barrio y de entregas de última milla. En la figura 3 se muestra una fotografía del día de la presentación del proyecto a ser desarrollado, donde pueden observarse los tres modelos propuestos para atender las necesidades de movimiento de una manera en que se incorpore la electromovilidad como eje principal.

Figura 6.3. Presidenta de México y el portafolio de mini vehículos OLINIA



México ha implementado sistemas de movilidad eléctrica compartida, incluyendo bicicletas en la Ciudad de México y Querétaro, así como monopatines y motocicletas eléctricas en varias entidades. Esta estrategia de micromovilidad se ha expandido a estados como Estado de México, Hidalgo, Morelos, Puebla y Tlaxcala. Paralelamente, empresas multinacionales, especialmente del sector de bebidas, logística y alimentación, están liderando la transición hacia flotas eléctricas, reduciendo significativamente su huella de carbono.

Barreras para la adopción de la transición energética y la movilidad

México enfrenta un reto significativo en la transición a flotas eléctricas: el elevado costo inicial de adquisición. Una alternativa estratégica sería establecer la producción local de estos vehículos, lo que reduciría los precios al eliminar gastos de importación. Esta medida no sólo aceleraría la adopción de autobuses eléctricos, sino que también impulsaría la economía nacional y promovería un crecimiento alineado con los objetivos de sostenibilidad.

La producción de vehículos eléctricos e híbridos depende de baterías de litio de alto rendimiento, material con propiedades ideales para almacenamiento energético, pero clasificado como residuo peligroso. Esto ha generado debates sobre protocolos de gestión para el desecho responsable de estas baterías al final de su vida útil. Es en este sentido que se desarrolló la Normativa Oficial Mexicana NOM-212-SCFI-2017, la cual establece y define las características de las pilas y baterías, su clasificación por tecnología del sistema electroquímico, los límites máximos permisibles de Mercurio y Cadmio, así como el etiquetado de las pilas. Aunado a esto, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos menciona que las baterías de litio están clasificadas como residuos de manejo especial, lo cual obliga a fabricantes, distribuidores y comerciantes internacionales a implementar programas de gestión ambiental que garanticen su producción, distribución y disposición final responsable.

Un debate central en la adopción de vehículos eléctricos gira en torno al origen de la electricidad que los alimenta. Si bien estos automóviles eli-

minan las emisiones directas, al carecer de motores de combustión, su huella ambiental depende críticamente de la matriz energética. Cuando la electricidad proviene de fuentes contaminantes como plantas carboeléctricas, simplemente se traslada la contaminación del escape al punto de generación. Es por esto que, para maximizar sus beneficios ambientales, la electromovilidad debe implementarse junto con sistemas de generación eléctrica basados en energías limpias, como la fotovoltaica o eólica.

Política pública de la transición energética

En México la Sener es la encargada de establecer un marco regulatorio para garantizar el aprovechamiento sustentable de los recursos energéticos, promoviendo prácticas que equilibren el desarrollo económico con la protección ambiental, también define las obligaciones específicas en materia de “energías limpias”, colocado entre comillas porque puede ser visto desde la cadena de valor completa y no parecen ser muy limpias, sin embargo, esto incentiva la adopción de tecnologías renovables como la solar, eólica e hidroeléctrica, con el fin de reducir la dependencia de combustibles fósiles. También tiene a su cargo fortalecer los principios de seguridad energética y diversificación de fuentes, asegurando que el país cuente con un sistema resiliente y menos vulnerable a fluctuaciones externas. En este contexto, impulsa medidas de ahorro y eficiencia energética en los sectores industrial, comercial y residencial, optimizando el consumo sin comprometer la productividad. Si lo vemos desde el punto de vista crítico y cuantitativo, tan solo en Estados Unidos, en el año 2023 tuvieron un consumo de energía eléctrica total de 4 084 578 GWh, en México, para el mismo año, el consumo fue de 332 042 GWh, la diferencia es abismal, por lo que es necesario reforzar el sistema eléctrico por medio de la política pública y la tecnología.

La normativa también fija requisitos obligatorios para la generación de electricidad mediante energías renovables, estableciendo metas claras y mecanismos de verificación que garanticen su cumplimiento. Esto no sólo facilita una transición energética gradual y ordenada en México, sino que también alinea las políticas nacionales con los compromisos internacionales en materia de cambio climático.

De esta manera, el marco legal no sólo impulsa la innovación tecnológica y la creación de empleos verdes, sino que posiciona a México como un actor responsable en la lucha global contra el calentamiento ambiental.

Conclusión

El análisis presentado evidencia que la transición hacia la electromovilidad en México avanza a través de un ecosistema complejo que integra políticas públicas, desarrollo tecnológico, infraestructura e iniciativas público-privadas. Si bien persisten desafíos significativos como la baja penetración actual en la matriz energética del transporte, la desaceleración reciente en ventas de autos eléctricos y la necesidad de expandir la red energética y la infraestructura de carga, los proyectos desarrollados en distintas ciudades de México demuestran avances concretos en transporte público eléctrico.

La ENME y la Alianza por la Electromovilidad articulan una hoja de ruta clara hacia 2030, donde la sinergia entre incentivos fiscales, estándares de eficiencia energética y educación al consumidor serán los elementos clave a seguir. Los datos recabados demuestran una gran contradicción, aunque los vehículos eléctricos representan aún una fracción mínima del parque vehicular, su eficiencia energética por sobre los motores de combustión interna y los proyectos piloto exitosos como la Línea 3 del Metrobús que ha reducido alrededor de 84% emisiones, validan su potencial transformador.

El caso Olinia simboliza la innovación local, mientras que los corredores de carga rápida y la colaboración entre el sector público y el privado muestran escalabilidad. Sin embargo, el éxito dependerá de superar tres obstáculos fundamentales, la accesibilidad económica, la integración con energías renovables y la adopción masiva más allá de las 10 ciudades prioritarias.

Referencias

- Alves, G. y Odriozola, J. (2024). RED 2024-Capítulo 8: Transporte y transición energética: hacia una movilidad sustentable.
- Barbosa, A. L. (2023). *Mecanismos complementarios para la transición del parque vehicular eléctrico privado en la Ciudad de México* [Tesis de Maestría]. Centro de Investigación y Docencia Económicas.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2025, 17 de enero). *Movilidad eléctrica*. <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/transporte-electromovilidad>
- Del Río, J. F., Del Río, D. D. F., Sovacool, B. K. y Griffiths, S. (2023). The demographics of energy and mobility poverty: Assessing equity and justice in Ireland, Mexico, and the United Arab Emirates. *Global Environmental Change*, 81, 102703.
- Echavarría Heras, H., Leal Ramírez, C., Millán Núñez, E., Montiel Arzate, E. y Rodríguez Reyes, C. (2023). *Introducción a la crisis ambiental: temas clave y desafíos* (Colección Sobre Epistemología de la Crisis Ambiental y Economía, Ensayo, 1.2). CICESE.
- Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica. (s/f). Semarnat. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/832517/2.3.ENME.pdf>
- Flores, E. R. S., Jaramillo, J. C. C., Estévez, C. J. V. y González, Á. R. P. (2023). Economía circular como base de la sustentabilidad empresarial. *Revista Publicando*, 10(38), 1-13.
- Gandomi, S., Barzegar, M., Zolghadri, S. y Rahimpour, M. R. (2024). The future of fossil fuels supply and impacts on sustainability. *Encyclopedia of Renewable Energy, Sustainability and the Environment*, 121.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2021, 5 de octubre). *Presenta INECC el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2019*. <https://www.gob.mx/inecc/articulos/presenta-inecc-el-inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-1990-2019-284532?state=published>
- Juárez, N. U. (2023). Transición energética en México, retos y desafíos. *Revista Lex*, 6(22), 308-318.
- Martínez Pérez, F. y Gassinski, L. (2022). La eficiencia energética y el papel del mantenimiento en la misma. *Ingeniería Energética*, 43(2), 10-18.
- Miyazaki, K. y Bowman, K. (2023). Predictability of fossil fuel CO2 from air quality emissions. *Nature Communications*, 14(1), 1604.
- Nochebuena, M. A. H., Acevedo, M. E. C., Gallegos, M. D. J. F., Centeno, O. F., Jiménez, J. R. H., Vega, D. V. y No, P. T. (2023). *Diagnóstico del desarrollo tecnológico en México para la incorporación de la electromovilidad en el autotransporte*.
- Organización Mundial de la Salud. (s/f). *Contaminación atmosférica*. <https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution>
- Pallonetto, F. (2023). Towards a more sustainable mobility. En *Handbook of computational social science for policy* (pp. 465-486). Springer International.
- Reyes, B. C., Reyes, J. A. y Turrubiarres, M. M. M. C. (2024). Por un futuro brillante: Ener-

- gías Renovables y Sostenibilidad en México. *Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad*, 3(1), 55-59.
- Rocha, E. M. B., Padilla, R. T., Piña, I. B. y García, C. J. G. (2024). Rumbo a un modelo sistémico para la gestión de estaciones de carga de vehículos eléctricos en el Valle de México. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales*, 24(3), 80-90.
- Sandoval, E. M. S. (2023). Eficiencia energética: motores de combustión interna vs. motores eléctricos. *Revista Multidisciplinar de Estudios Generales*, 2(2), 18-27.
- Soeder, D. J. (2025). Replacing fossil fuels. En *Energy futures: The story of fossil fuel, greenhouse gas, and climate change* (pp. 143-183). Springer Nature.
- Solís, A. P. F. (2025). Economía circular y su relación con la sustentabilidad. *Revista Latinoamericana de Investigación Social*, 8(1), 100-110.
- Straffon, A., Ferrari, L. y Masera, O. (2024). *Transición energética justa y sustentable: contexto y estrategias para México*.
- Toledo, A. D. S. (2023). Riesgos de la transición energética postfosilista en América Latina: sobreexplotación y contaminación de la naturaleza. *Religación: Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 8(36), 11.
- Ullah, S., Luo, R., Nadeem, M. y Cifuentes-Faura, J. (2023). Advancing sustainable growth and energy transition in the United States through the lens of green energy innovations, natural resources and environmental policy. *Resources Policy*, 85, 103848.
- Wahlund, M. y Palm, J. (2022). The role of energy democracy and energy citizenship for participatory energy transitions: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science*, 87, 102482.
- Yadlapalli, R. T., Kotapati, A., Kandipati, R. y Koritala, C. S. (2022). A review on energy efficient technologies for electric vehicle applications. *Journal of Energy Storage*, 50, 104212.
- Zacua. (2025). *Nacidos eléctricos: Eléctrico, mexicano, urbano* [Página web]. <https://zacua.com/>
- Zhang, L. y Ma, D. (2022). A hybrid approach toward efficient and accurate intrusion detection for in-vehicle networks. *IEEE Access*, 10, 10852-10866.

7. Innovaciones en simulación y evaluación de impacto para la gestión integrada de los recursos hídricos*

JORGE ALEJANDRO SILVA RODRÍGUEZ DE SAN MIGUEL **

CHRISTIAN MUÑOZ SÁNCHEZ ***

CRISTINA GARIBAY BAGNIS ****



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.07>

Resumen

El acceso a agua dulce es un desafío; la gestión integrada de los recursos hídricos es vital para abordar la sequía, el cambio climático y la degradación ambiental. Durante el período de 2021 a 2025, los estudios prominentes se definen, entre ellos las innovaciones con relación a las herramientas de simulación y evaluación del impacto de la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH). La simulación presenta modelos de escenarios cambiantes, opuestos a la evaluación del impacto que mide recompensas y fomenta la sostenibilidad de las políticas. Sin embargo, las brechas regionales persisten en términos socioculturales, de integración y de datos, además de ser mínimas, especialmente en regiones en vías de desarrollo. Aspectos emergentes identificados son el “riesgo climático” modelado, *big data* y métricas de sostenibilidad codificadas. La discusión ocurrió entre lo que es ser complejo o accesible, expertos en o frente a expertos, en términos de enfoque coac-

* Derivado del proyecto SIP 20240598: “Responsabilidad social empresarial y sostenibilidad en el abastecimiento de agua”.

** Doctor en Ciencias Administrativas. Profesor del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-4696> ; correo electrónico: jasilva@ipn.mx

*** Doctor en Ciencias Sociales. Profesor-investigador del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8692-4252>

**** Doctora en Tecnología Avanzada. Profesora-investigadora del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4858-1110>

tual, de prioridades políticas frente a prioridades científicas. Este estudio demuestra la importancia de herramientas emergentes y la investigación interdisciplinaria y el seguimiento a largo plazo para la equidad y la GIRH resiliente del flujo de agua. La investigación a futuro debe abordar las deficiencias metodológicas, asegurando diversidad y el establecimiento de cuadros adaptados al entorno global donde se encuentren.

Palabras clave: *evaluación de impacto ambiental, gestión integrada de los recursos hídricos, modelación hidrológica, resiliencia hídrica.*

Introducción

La GIRH y el contexto ambiental más amplio han dejado de lado los enfoques sectoriales para adoptar enfoques integrados que reflejan las complejas interdependencias y los ciclos de retroalimentación entre estos sistemas hidrológicos, ecológicos y socioeconómicos (Jain y Singh, 2023; Mishra et al., 2021). Este cambio es parte de una tendencia más amplia impulsada en parte por un creciente conjunto de pruebas de que las estrategias de gestión fragmentadas o monosectoriales no se abordan adecuadamente. La urgencia de encontrar soluciones holísticas ha aumentado en varias zonas del planeta (Siqueira-Gay et al., 2022; Diefenderfer et al., 2021).

De este modo, la simulación y la evaluación de impacto se convierten en estrategias invaluable para los tomadores de decisiones y las partes interesadas en tales. Mediante la simulación, se pueden analizar las interacciones entre múltiples sistemas (por ejemplo, el flujo de agua, la propagación de contaminantes, el uso de la tierra, etc.), se pueden simular y analizar en un entorno virtual (Ntona et al., 2022).

Por un lado, las herramientas de simulación proporcionan información sobre las condiciones futuras a través de bucles de retroalimentación dinámicos y pruebas de situaciones hipotéticas para guiar las decisiones sobre la distribución de recursos y fundamentar la política adaptativa (Ntona et al., 2022). Por otro lado, la evaluación de impacto es un procedimiento sistemático aplicado para evaluar los impactos posteriores, incluyendo social, económico y ambiental, de un plan de crecimiento en tiempo real o no.

Ambos enfoques proporcionan una descripción de los efectos a corto y largo plazo, fundamentan la política basada en la evidencia que optimiza el respeto a los derechos humanos (Abatan et al., 2024; Salahshoori et al., 2024).

A pesar de la importancia de los enfoques integrados, aún existen múltiples barreras, en primer lugar, las estrategias de gestión fragmentadas suelen ser una manifestación de compartimentos institucionales, en los que se asignan a diferentes dependencias con responsabilidades separadas para el suministro de agua, el uso de la tierra, el control de la contaminación, y conservación con poca superposición (Adom y Simatele, 2024; Azhoni et al., 2024). En segundo lugar, la colaboración limitada entre disciplinas y sectores obstaculiza el desarrollo de modelos verdaderamente integrados, lo que da como resultado análisis que descuidan los ángulos sociales o económicos relevantes (Adom y Simatele, 2024; Azhoni et al., 2024).

Por último, la disponibilidad y la calidad de los datos siguen siendo una limitación casi insoluble, ya que muchas regiones no cuentan con los conjuntos de datos de alta resolución necesarios para realizar simulaciones robustas o evaluaciones de impacto rigurosas (Adom y Simatele, 2024; Azhoni et al., 2024). Estos desafíos ponen de relieve la urgencia de aplicar enfoques innovadores e interdisciplinarios que incorporen perspectivas de múltiples partes interesadas y aborden condiciones futuras inciertas.

El objetivo principal de este artículo es analizar los estudios destacados que incluyen las innovaciones en el uso de herramientas de simulación y evaluación de impacto de la GIRH. Esta revisión pretende ilustrar las mejores prácticas y las nuevas tendencias en el área de herramientas de simulación a través de una amplia evaluación del diseño, la implementación y los resultados de las herramientas de simulación actualmente en uso. Se centra en las investigaciones publicadas entre 2021 y 2025, abarcando el enfoque debido a su reflexión actual de la investigación básica y avanzada sobre los activos hídricos incorporados. Este periodo abarca importantes desarrollos que se han producido junto con los avances tecnológicos, como los más avanzados herramientas de teledetección y marcos de políticas emergentes que enfatizan la sostenibilidad y la resiliencia.

Aunque los marcos de GIRH sean relevantes a nivel mundial, esta revisión será global en el sentido de que no se limitará a un contexto regional, abordando zonas secas, tierras costeras, o ríos, y abarcando tanto a los paí-

ses desarrollados como a los subdesarrollados (Smith et al., 2024; Jacob et al., 2024). Por lo tanto, no puede haber otra justificación para esta amplia comprensión, ya que las cuestiones de agua no respetan las fronteras políticas o geográficas y deben abordarse de forma específica a este nivel (Smith et al., 2024; Jacob et al., 2024).

El enfoque se centra en los estudios de regiones que enfrentan un estrés hídrico agudo, como partes de Asia, África y América Latina, donde los efectos de la variabilidad climática y la sobreextracción de recursos son particularmente manifiestos (Jacob et al., 2024; Smith et al., 2024). El análisis también cubrirá regiones con marcos de gobernanza ya establecidos (por ejemplo, en Europa y América del Norte) para mostrar las mejores prácticas y lecciones que se pueden transferir.

Después de esta introducción, se integra la sección de método, luego la sección del marco teórico, luego la revisión de hallazgos y finalmente las conclusiones.

Términos y conceptos clave

La GIRH se define generalmente como el desarrollo y la gestión coordinados del agua, la tierra y los recursos relacionados con el fin de maximizar los beneficios económicos y sociales, considerando el bienestar sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (Nagata et al., 2022). Uno de los elementos clave de la GIRH es la idea de que los diferentes desafíos de la gestión del agua (por ejemplo, la escasez de agua, la contaminación y el control de inundaciones) están interrelacionados y no se pueden resolver de manera efectiva, de forma aislada (Nagata et al., 2022). En esta misma línea, la GIRH como un sistema político y de planificación se centra en la planificación y las regulaciones que involucran la participación de las partes interesadas y la integración entre políticas y gobernanza adaptativa, que hace referencia a la necesidad de adaptar la gobernanza a la dinámica y las condiciones concretas de sus desafíos actuales y a la gestión orientada resultados y la revisión derivados de la adaptación (Nagata et al., 2022).

El modelado de simulación es una técnica de computadora que los investigadores utilizan para representar y analizar sistemas del mundo real,

de modo que ellos y los responsables de la toma de decisiones pueden hipotetizar escenarios y, al hacerlo, predecir cómo se comportarán los sistemas en escenarios hipotéticos bajo condiciones diversas (Ortiz-Partida et al., 2023). Respecto a la simulación en recursos hídricos los investigadores modelan variables hidrológicas, ecológicas, y socioeconómicas para capturar y describir los sistemas y dinámicas, incluida la propagación de contaminantes y la gestión de cantidades de agua en embalses, entre otras cosas (Ortiz-Partida et al., 2023). Los modelos van desde la física hidrológica, por ejemplo, el SWAT, WEAP y MODFLOW, hasta modelos basados en *big data*, aprendizaje automático e IA (Ortiz-Partida et al., 2023). La evaluación de impacto es un proceso sistemático que se realiza para intentar evaluar los impactos ambientales, sociales, y económicos que podrían causar los proyectos y propuestas basadas en políticas. Aunque no es una técnica en sí, sino una serie de ellas, la EIA, la EIS, y la EAE buscan hacer predicciones de lo que ocurrirá y basarse en ello para tomar ciertas decisiones (Moss et al., 2021).

Las evaluaciones de impacto ayudan a lograr esto al identificar posibles resultados adversos o beneficiosos y, por lo tanto, proporcionan una herramienta importante que puede utilizarse para evitar impactos adversos, maximizar los positivos y garantizar el cumplimiento de las normas y regulaciones de sostenibilidad y otros tipos (Moss et al., 2021).

Método

Búsqueda y selección de estrategia

Esta revisión se realizó de acuerdo con las pautas PRISMA 2020 con la intención de mantener la transparencia y el rigor durante todo el proceso de búsqueda y síntesis (Page et al., 2021). Además, se realizó una búsqueda bibliográfica sensible en 5 bases de datos electrónicas, incluidas Web of Science (WoS), Scopus, Google Scholar, Science Direct y EBSCO. Se eligieron estas bases de datos debido a su amplia cobertura de artículos de revistas revisadas por pares en campos relacionados con los recursos hídricos.

Para reflejar la naturaleza compleja de gestión integrada de los recursos hídricos, se utilizaron las siguientes cadenas de búsqueda: “recursos hídri-

cos”, “simulación” O “modelado”, “evaluación de impacto”; combinados utilizando el valor booleano (AND; OR) para garantizar que los estudios capturaran ambos aspectos de la simulación/modelado y la evaluación de impacto en relación con los contextos de gestión de los recursos hídricos.

La primera búsqueda abarcó desde 2021 a 2025. El límite inferior (2021) se seleccionó para reflejar un período importante en el que se aplican enfoques integrados y las herramientas de simulación avanzadas ganaron mayor atención. El límite superior (2025) captura nuevos estudios publicados desde 2023 y publicaciones esperadas de los materiales estudiados en línea.

La selección inicial se realizó a través de una revisión de títulos y resúmenes para garantizar la pertinencia de los estudios para los temas centrales (es decir, simulación, evaluación de impacto y gestión integrada de los recursos hídricos). Después esta etapa, se revisaron los registros duplicados e irrelevantes y se revisó el texto completo de los estudios que cumplían explícitamente los criterios de inclusión. Además, se puntuaron los estudios en función de la claridad de las preguntas de investigación, idoneidad del diseño del estudio, validez de la medición y solidez del análisis de datos.

Marco teórico

Evolución de la gestión de los recursos hídricos

La gestión de los recursos hídricos fue históricamente basada en objetivos múltiples de un único propósito (para riego, control de inundaciones, energía hidroeléctrica, etc.), en consonancia con una perspectiva tecnocrática y de ingeniería (Zhao et al., 2022). Hasta mediados del siglo xx, las dependencias gubernamentales trabajaron principalmente en silos; se centraron en construir infraestructura física como represas, canales y tuberías para responder a las crecientes demandas sociales (Zhao et al., 2022). Esta filosofía desagregada a menudo ha descuidado las consideraciones ambientales y sociales más amplias, lo que ha dado lugar a la degradación ecológica y a intereses conflictivos entre las partes interesadas en numerosas cuencas fluviales a nivel mundial (Zhao et al., 2022).

Sin embargo, con el tiempo se ha ido tomando conciencia de los roles multidimensionales del agua que (como recurso natural esencial y un elemento fundamental para el desarrollo sostenible) condujo a un realineamiento hacia perspectivas integradoras (Vo et al., 2025; Yap y McLellan, 2024). Esto abrió la puerta para que el agua sea una forma de que los investigadores y los responsables de las políticas comprendan cómo el impacto de las decisiones (por ejemplo, en la agricultura) puede afectar involuntariamente a otro sector (por ejemplo, el suministro de agua municipal), lo que ha llevado a pedir que se establezcan marcos holísticos (Vo et al., 2025; Yap y McLellan, 2024).

A fines del siglo xx, los diálogos sobre políticas globales caracterizaron cada vez más al agua como un bien público que necesita una asignación equitativa, colaboración interdisciplinaria y gobernanza adaptativa (Vo et al., 2025; Yap y McLellan, 2024). Este nuevo enfoque allanó el camino para la GIRH, que proporcionó un paraguas conceptual general para reunir las dimensiones técnicas, ecológicas, económicas y sociopolíticas. Estas ideas han pasado a ser objeto de debate últimamente con algunos avances recientes, y por ejemplo, los modelos de cambio climático o la participación de las partes interesadas (Vo et al., 2025; Yap y McLellan, 2024) que consolidaron la resiliencia de estrategias sistémicas y prospectivas que cruzan los límites sectoriales tradicionales.

Hay hitos clave que influyen en la conversación global sobre la gestión integrada de los recursos hídricos:

1. *Principios de Dublín (1992)*. La Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente afirmó que el agua es un recurso limitado y frágil, básico para vida y en el medio ambiente y alentó la participación actualizada de las partes interesadas, incluidas las mujeres, en su gestión (Ofori y Mdee, 2022).
2. *Agenda 21 (1992)*. En la CNUMAD celebrada en Río de Janeiro, el Capítulo 18 abogó por el desarrollo sostenible de agua a través de la protección integradora de las dimensiones económicas, sociales y ambientales en su gestión (Saiu et al., 2022).
3. *Marco GWP*. Establecido en 1996, GWP adoptó un enfoque práctico para promover la GIRH a través de esfuerzos de desarrollo de capaci-

dades y estrategias participativas, en consonancia con Dublín y la Agenda 21 (Saiu et al., 2022).

4. *Directiva Marco del Agua de la UE (2000)*. Esta legislación supranacional tenía como objetivo el “buen estado ecológico” en todas las aguas europeas a través de planes de gestión de cuencas, lo que ilustra la promesa de los marcos integrados (Saiu et al., 2022).
5. *Agenda de Desarrollo Post-2015*. La integración de la gestión del agua se consolidó como un aspecto clave del desarrollo, cambiando el foco hacia la participación, la financiación innovadora y la tecnología con el lanzamiento de los ODS, en particular a través del ODS 6 (Saiu et al., 2022).

Pensamiento sistémico

Reconociendo que lo natural, lo social y lo económico están interrelacionados dinámicamente en múltiples escalas, el pensamiento sistémico en la GIRH promueve un análisis holístico de los desafíos relacionados con el agua (Marques et al., 2022; Scanlon et al., 2023). En lugar de desglosar solo variables singulares (por ejemplo, suministro de agua, contaminación o agricultura), los modelos basados en sistemas de demanda ayudan a explorar los ciclos de retroalimentación y las interacciones no lineales que pueden tener un impacto desproporcionado en los resultados de la gestión (Marques et al., 2022; Scanlon et al., 2023). Al tratar la cuenca hidrográfica o cuenca fluvial como una unidad a nivel de sistemas, las partes interesadas están mejor capacitadas para predecir el impacto intersectorial de intervenciones como la construcción de presas, la expansión agrícola o las reformas de políticas (Marques et al., 2022; Scanlon et al., 2023).

Un beneficio esencial del pensamiento sistémico para la implementación de la GIRH es el potencial de los modelos integrados para fusionar diferentes conjuntos de datos, por ejemplo, combinando datos hidrológicos, socioeconómicos y ecológicos (Marques et al., 2022; Hariram et al., 2023). Dichos modelos pueden utilizar diagramas de bucles causales y simulaciones de flujo de existencias para rastrear cómo un cambio en el precio del agua, por ejemplo, podría conducir a cambios en el comportamiento del consumidor,

lo que luego afectaría la producción agrícola y los servicios ecosistémicos (Marques et al., 2022; Hariram et al., 2023). A medida que el cambio climático conduce a una mayor variabilidad e incertidumbre en la cantidad de agua disponible, el pensamiento sistémico proporciona un marco estructurado en el que considerar la gobernanza adaptativa y en el que los tomadores de decisiones pueden evaluar y revisar políticas a medida que se disponga de nueva información (Marques et al., 2022; Hariram et al., 2023). La participación es un componente clave de los enfoques basados en sistemas, y los talleres de modelado participativo y los ciclos de retroalimentación integran iterativamente el conocimiento local (Marques et al., 2022; Hariram et al., 2023) y las consideraciones de equidad para modelar la configuración y los diálogos de políticas.

Sistemas adaptativos complejos

El paradigma de los sistemas adaptativos complejos (CAS) se suma a la perspectiva de sistemas al reconocer el comportamiento exploratorio activo en busca de supervivencia de varios agentes en la gestión del agua y el medio ambiente (Fei et al., 2021). En los CAS, los sistemas están compuestos por agentes interdependientes (individuos, comunidades, instituciones) cuyas interacciones crean comportamientos emergentes que son impredecibles al considerar los componentes de forma aislada. Los recursos son de naturaleza coevolutiva, aunque se modifican constantemente por las interacciones entre las intervenciones humanas y los procesos ambientales (Fei et al., 2021).

Dado que las políticas en CAS son iterativas y se utiliza la retroalimentación para adaptarlas al sistema (Wang et al., 2021), la adaptación es clave. Así, por ejemplo, una política de riego agrícola que agote las aguas subterráneas tendría que adaptarse iterativamente en función de los datos, la retroalimentación de actores, modelos actualizados, etc. Este enfoque apunta a la necesidad de flexibilidad y estructuras de gobernanza escalables capaces de adaptarse a dinámicas locales, nacionales y transfronterizas y, al mismo tiempo, evitar efectos contraproducentes en cascada (Wang et al., 2021).

Los Modelos Basados en Agentes (ABM) han simulado modelos heterogéneos, las respuestas de los actores (agricultores, industrias, reguladores) a las políticas o estímulos ambientales. Estas simulaciones muestran autoorganización como el surgimiento de cooperativas espontáneas en contextos institucionales débiles (Wang et al., 2021). Debido a que los modelos CAS son capaces de describir dinámicas no lineales y puntos de inflexión, pueden proporcionar alertas sobre eventos críticos que impactan desproporcionadamente en la calidad del agua o su disponibilidad (Wang et al., 2021).

El pensamiento sistémico y el CAS, a su vez, constituyen la base para una educación integrada y gestión adaptativa y fomentar paradigmas cíclicos y participativos característicos de la compleja asignación de recursos hídricos, la salud de los ecosistemas y la participación de las partes interesadas (Blasi et al., 2022). Estos enfoques sustentan el análisis de metodologías de simulación y evaluación de impacto para abordar la complejidad fundamental de los sistemas hídricos (Blasi et al., 2022).

Principales estudiosos y escuelas de pensamiento

La génesis de la GIRH y la EIA se remonta al trabajo fundacional de los primeros académicos (Di Vaio et al., 2021). La multidimensionalidad de Asit K. Biswas destaca la gestión del agua y su dimensión sociopolítica, y Malin Falkenmark introdujo los “índices de estrés hídrico” para promover un enfoque integrado de los factores ecológicos, económicos y sociales (Di Vaio et al., 2021). Loucks y Van Beek, por su parte, Riki Therivel y Robert K. Morgan crearon herramientas matemáticas para la planificación hidrológica. Fueron pioneros en la integración de consideraciones ambientales en las primeras etapas de la planificación de proyectos en su trabajo sobre EIA, teniendo una gran influencia en las evaluaciones ambientales estratégicas y su expansión para abarcar elementos sociales y económicos (Di Vaio et al., 2021).

Claudia Pahl-Wostl ha coadyubado al desarrollo de modelos de gobernanza del agua ajustados a los sistemas y resiliencia al cambio climático. Cecilia Tortajada ha enriquecido la comprensión de la seguridad hídrica y las políticas de gestión transfronteriza, trabajando en conjunto con organi-

zaciones internacionales (Di Vaio et al., 2021; Velásquez, 2021; Hariram et al., 2023). Genevieve Connors, por otro lado, ha estado interesada en métodos innovadores de investigación participativa y conocimiento indígena para la evaluación de impacto ambiental (Di Vaio et al., 2021; Velásquez, 2021). A su vez, X. Chen ha adaptado modelos basados en agentes a proyectos de evaluación socioecológica (Hariram et al., 2023). Los nuevos esfuerzos recientes en GIRH y EIA reflejan la necesidad de diversidad y la urgencia de enfoques adaptativos, equitativos y basados en la evidencia (Di Vaio et al., 2021; Velásquez, 2021; Hariram et al., 2023).

Debates y controversias

Primero, la nueva polémica en la GIRH. Este equilibrio cuestiona la necesidad de enfoques holísticos para comprender los sistemas hídricos y sugiere que se necesita una especialización para la toma de decisiones informadas y basadas en la evidencia (Di Vaio et al., 2021; Obaideen et al., 2022). En segundo lugar, los dos segmentos discuten a quienes prefieren los modelos de efecto relevante, pero simplicistas, como asistidos por computadora, y quien defiende la simulación más profunda, con recursos limitados, simulaciones útiles para la autoasistencia o el contexto de asistencia limitada. Mientras que los buenos modelos simples aumentan la participación de las partes interesadas y la transparencia, los modelos simples son demasiado simplificados, lo que resulta en un final entre sofisticación y practicidad (Di Vaio et al., 2021; Wang et al., 2021).

En tercer lugar, el debate sobre la política científica individual: los enfoques basados en políticas son prácticos y contextuales, mientras que los enfoques científicos son innovadores y pertinentes (Di Vaio et al., 2021; Wang et al., 2021). A su vez, se está discutiendo la preferencia de investigación de políticas de corto plazo o la independencia científica a largo plazo. Lo anterior sugiere un enfoque híbrido preferido por la combinación de experiencia científica y transcendencia social para equilibrar la independencia y la relevancia (Kamyab et al., 2023; Velásquez, 2021). En total, estos debates resaltan la naturaleza multifacética de la GIRH y los marcos de go-

bierno deberán unir el conocimiento técnico con la practicidad y la relevancia social para gestionar el agua de forma resiliente y sostenible.

Principales hallazgos

Resultados de la evaluación de impacto

Uno de los aspectos de impacto que se considerarán más ampliamente con respecto a GIRH o el MED es el análisis de la respuesta ambiental. Los registros de los indicadores de calidad de agua, actividades de restauración de hábitat o dinámica de biodiversidad (Di Vaio et al., 2021; Scanlon et al., 2023). Se ha demostrado de manera efectiva, a partir de la implementación de modelos de caudal ecológico, que han existido mejoras en la calidad del hábitat del agua y la diversidad de especies, planes de extracción de agua en los que se incluyeron liberaciones adaptativas para cumplir con los caudales mínimos (Di Vaio et al., 2021; Scanlon et al., 2023).

Las técnicas de teledetección de alto rendimiento han permitido una mejor detección de los cambios en la cobertura terrestre y han ilustrado cómo la reforestación de cuencas hidrográficas o el establecimiento de zonas de amortiguación pueden producir ganancias a largo plazo en la salud de los arroyos y la retención de nutrientes (Di Vaio et al., 2021; Scanlon et al., 2023).

Estudios recientes también están haciendo hincapié en los modelos de dispersión, que caracterizan el destino de los contaminantes bajo diferentes condiciones de gestión (Di Vaio et al., 2021). Estas evaluaciones han demostrado reducciones en las cargas de fósforo y sedimentos dentro de las aguas receptoras cuando se implementan las mejores prácticas de gestión (BMP) específicas, incluidos los humedales construidos en los planes agrícolas o de cuencas hidrográficas (Di Vaio et al., 2021). En conjunto, estos resultados demuestran el potencial de las intervenciones integradas y basadas en evidencia para abordar los patrones de degradación ecológica y mejorar la resiliencia de los ecosistemas (Di Vaio et al., 2021).

Por lo tanto, los resultados socioeconómicos son un elemento clave de las evaluaciones de impacto dentro de la GIRH, con indicadores de resilien-

cia comunitaria y satisfacción de las partes interesadas y la viabilidad económica es particularmente importante (Wang et al., 2021; Di Vaio et al., 2021). Varios estudios han demostrado que la gestión participativa del riego, incluido el acceso equitativo al agua, conduce a una mayor producción agrícola y, por lo tanto, a una mejora de los medios de vida de las comunidades rurales (Wang et al., 2021; Di Vaio et al., 2021). Además, se han empleado algunos enfoques (por ejemplo, el análisis de decisiones de múltiples criterios (MCDA) para evaluar la relación coste-eficacia del agua e infraestructura de tratamiento, lo que demuestra que la participación de las partes interesadas locales puede aumentar sustancialmente la aceptación del proyecto y la sostenibilidad a largo plazo (Wang et al., 2021; Di Vaio et al., 2021).

Una tendencia complementaria es la inclusión de Evaluaciones de Impacto Social (EIS) con evaluaciones ambientales, en las que se recogen dimensiones cualitativas como los valores culturales, los conocimientos tradicionales y los impactos de género (Di Vaio et al., 2021; Ishaque et al., 2023). Se ha demostrado que los procesos de planificación inclusivos, mediante los cuales los miembros de la comunidad son cocreadores de estrategias de gestión, aumentan la cohesión social y desarrollan capacidades de adaptación de las poblaciones vulnerables (Di Vaio et al., 2021; Ishaque et al., 2023).

Estos hallazgos han tenido importantes implicaciones políticas, orientando los marcos regulatorios y las estructuras de gobernanza (Obaideen et al., 2022; Srivastav et al., 2021). Como las evaluaciones de impacto que muestran los ahorros a largo plazo de la infraestructura verde, han llevado a algunos municipios a implementar nuevas normas de gestión de aguas pluviales. En las cuencas fluviales transfronterizas con conflictos en curso sobre la asignación de recursos, se ha informado que las evaluaciones de impacto con base científica facilitan las negociaciones que dan como resultado el establecimiento de organizaciones de cuencas fluviales y acuerdos de gestión conjunta (Obaideen et al., 2022; Srivastav et al., 2021). Cada vez hay más pruebas que destacan la importancia de realizar una evaluación de impacto exhaustiva en la formulación de políticas para garantizar que la evidencia se refleje en los marcos nacionales e internacionales de gobernanza del agua (Obaideen et al., 2022; Srivastav et al., 2021).

Estudios comparativos

Múltiples estudios de caso —de regiones tan diversas como el Sudeste Asiático, el África subsahariana y Sudamérica— han identificado factores críticos de éxito y obstáculos para la implementación eficaz de la GIRH. Por ejemplo, en situaciones áridas y semiáridas, la asignación adaptativa es el principal factor de éxito, es decir, distribución justa de recursos hídricos limitados (Di Vaio et al., 2021; Ishaque et al., 2023). Por otro lado, las zonas costeras enfrentan problemas como la intrusión de agua salada y el aumento del nivel del mar, y las evaluaciones integradas indican la restauración de manglares y las zonas de amortiguamiento costeras como estrategias de mitigación eficientes (Di Vaio et al., 2021; Ishaque et al., 2023). Sin embargo, en todas las regiones, la fragmentación de las instituciones que separan la supervisión de varios sectores de la gestión del agua con poca (o ninguna) coordinación (Di Vaio et al., 2021; Sahoo y Goswami, 2024) surge como una barrera común.

Los análisis multimodo indican que los modelos hidrológicos en combinación con submodelos socioeconómicos o ecológicos suelen producir evaluaciones de impacto más sólidas que los estudios de un sólo método (Di Vaio et al., 2021; Hariram et al., 2023). Mediante la integración del análisis de decisiones de múltiples criterios (MCDA) junto con la información geográfica. Por ejemplo, con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los investigadores pueden ahora explorar los cambios en el uso de la tierra, la disponibilidad de agua y los servicios ecosistémicos a una escala más definida. Sin embargo, estos enfoques de modelado integrados pueden requerir una gran cantidad de datos y ser técnicamente sofisticados, por lo que surge la necesidad de desarrollar capacidades y conocimientos especializados intersectoriales para optimizar las oportunidades de éxito (Di Vaio et al., 2021; Hariram et al., 2023).

Resultados contradictorios

Existe un amplio consenso sobre los beneficios de evaluaciones de impacto basadas en simulaciones, pero las diferencias entre sus proponentes surgen por muchas razones:

1. *Diferencias en la escala del modelo*: pueden ocurrir resultados inconsistentes en escalas espaciales diádicas y escalas temporales; por ejemplo, un modelo centrado en los impulsores y la dinámica de las cuencas puede descuidar las interacciones entre cuencas a nivel de microcuenca (Sigalla et al., 2021).
2. *Calidad de los datos*: en muchas regiones, especialmente en el sur global, el monitoreo limitado conduce a una fuerte dependencia de datos secundarios o satélites de escala gruesa, imágenes que aportan incertidumbres a los resultados del modelo (Sigalla et al., 2021).
3. *Participación insuficiente de las partes interesadas*: la investigación sin una participación adecuada de las partes interesadas puede sesgar las necesidades locales y comunitarias, prioridades que resultan en contradicciones o inexactitudes en los hallazgos (Sigalla et al., 2021).

Los investigadores abogan por protocolos estandarizados (por ejemplo, la adopción de formatos de datos uniformes, puntos de referencia de calibración y métricas de validación) para permitir comparaciones entre modelos y regiones (Kaiser et al., 2022; Sigalla et al., 2021). Además, la incertidumbre se puede reducir mediante el uso de métodos de conjunto o validación cruzada con múltiples modelos, lo que da como resultado una amplia distribución sobre posibles conciliaciones de las perspectivas de las partes interesadas, también es eficaz a través de talleres de modelado participativo, que ayuda a garantizar que se cumplan los supuestos del modelo (por ejemplo, los valores de los parámetros (Kaiser et al., 2022; Sigalla et al., 2021).

Tendencias emergentes

Una de las principales tendencias emergentes en la GIRH es el enfoque sistemático para considerar escenarios de cambio climático al planificar y tomar decisiones (Kaiser et al., 2022; Sigalla et al., 2021). Los investigadores están empezando a utilizar modelos climáticos globales (GCM) a escala reducida, proyecciones hidroclimáticas y análisis de escenarios para comprender mejor cómo es probable que el aumento de las temperaturas, los cambios en los patrones de precipitación y los fenómenos meteorológicos extremos

afecten el funcionamiento de las cuencas hidrográficas y la disponibilidad de recursos (Kaiser et al., 2022; Sigalla et al., 2021). Al reunir los componentes del sistema de suministro de agua, estos modelos integradores ayudan a los tomadores de decisiones a diseñar respuestas adaptativas y proactivas, por ejemplo, actualizando los criterios de operación de los embalses o utilizando planes de contingencia para sequías (Kaiser et al., 2022; Sigalla et al., 2021).

Mientras, los modelos de riesgo climático están ganando terreno y hay importantes deliberaciones sobre las incertidumbres que implican las proyecciones a largo plazo; sin embargo, los modelos climáticos pueden producir una amplia gama de resultados o incluso resultados contradictorios, en particular cuando se reducen a escala local o regional, debido a diferencias en los datos de entrada, los supuestos y técnicas computacionales utilizadas (Srivastav et al., 2021; Fei et al., 2021). Los críticos dicen que tener que depender demasiado de proyecciones erróneas puede llevar a inversiones desalineadas o ineficientes en términos de costos en infraestructura y políticas; otros sostienen que, al menos (si) las incertidumbres siguen siendo altas, es mejor protegerse contra los escenarios climáticos que dejarlos de lado en los planes de gestión en su conjunto, ya que los enfoques de “sin arrepentimiento” o de “bajo arrepentimiento” pueden generar beneficios de resiliencia en una gama más amplia de posibles climas futuros (Srivastav et al., 2021; Fei et al., 2021).

Por lo tanto, una controversia central se refiere a encontrar un equilibrio entre un modelo climático riguroso, pero prescriptivo y enfoques de gestión flexibles e iterativos que se adaptan a los datos emergentes y las condiciones cambiantes (Srivastav et al., 2021; Fei et al., 2021).

Modelo participativo de las partes interesadas

Una tendencia complementaria, ampliamente considerada como una segunda tendencia importante, es el surgimiento de enfoques participativos que involucren a las comunidades locales, las organizaciones no gubernamentales (ONG) y los encargados de formular políticas en la creación conjunta de modelos y herramientas de apoyo a la toma de decisiones (Di Vaio et al.,

2021; Scanlon et al., 2023). Esta voluntad de trabajar juntos demuestra la comprensión de que es necesario ir más allá del enfoque puramente técnico y científico adoptado en la primera agenda mundial del agua y tener en cuenta el contexto político, social y cultural matizado a través del cual se desarrolla la gestión del agua (Di Vaio et al., 2021; Scanlon et al., 2023). Las investigaciones muestran que los procesos de modelización participativa (por ejemplo, talleres de escenarios, diálogos entre múltiples partes interesadas) pueden mejorar la calidad de los datos o la confianza y aceptación en soluciones propuestas (Di Vaio et al., 2021; Scanlon et al., 2023).

Aunque la participación de las partes interesadas ha sido aclamada como un mecanismo para aumentar la legitimidad y la equidad en el proceso de toma de decisiones. Con respecto a la gestión del agua, aún existen desafíos para garantizar la incorporación significativa de modelado impulsado por expertos junto con el conocimiento local o indígena (Scanlon et al., 2023; Di Vaio et al., 2021). Los detractores de los enfoques participativos a gran escala argumentan que estos procesos requieren mucha mano de obra. Los modelos desarrollados utilizando sólo información de expertos, a menudo carecen de conocimientos específicos del sitio que permitan una gestión eficiente porque las estrategias no se ajustan a las realidades del sitio de uso (Scanlon et al., 2023; Di Vaio et al., 2021). El término medio son los enfoques híbridos que combinan modelos hidrológicos o ecológicos especializados con procesos estructurados para la retroalimentación de las partes interesadas locales, mejorando la precisión técnica y la relevancia comunitaria (Scanlon et al., 2023; Di Vaio et al., 2021).

Innovaciones tecnológicas

Una tendencia reciente es la explosión de avances tecnológicos utilizados para recopilar, analizar y compartir datos sobre el agua, análisis de *big data*, utilizar grandes conjuntos de datos (recopilados desde satélites de teledetección hasta sensores de internet de las cosas [IoT]) para permitir el monitoreo casi en tiempo real de parámetros relacionados con el flujo y la calidad del agua y los cambios en el uso de la tierra (Kumar y Choudhury, 2024; Aivazidou et al., 2021). Las soluciones en la nube y los DSS pueden

respaldar integración rápida de diversos datos para permitir la prueba de escenarios y el desarrollo adecuado de políticas por parte de partes interesadas dispersas (Kumar y Choudhury, 2024; Aivazidou et al., 2021). Hoy en día, muchos municipios y dependencias de agua utilizan la detección de anomalías impulsada por IA como un sistema de alerta temprana contra el riesgo de inundaciones o fallas de infraestructura (Kumar y Choudhury, 2024; Aivazidou et al., 2021).

Aparte de estos avances, los problemas relacionados con el acceso equitativo y la privacidad de los datos siguen siendo un tema candente de vanguardia. Estas herramientas de vanguardia suelen exigir una infraestructura de internet sofisticada, computación de alto rendimiento y conocimientos especializados, ninguno de los cuales está igualmente disponible en las regiones (Kouhizadeh et al., 2021; Malik et al., 2021). La baja capacidad financiera e institucional en los contextos en desarrollo puede impedir la adopción de tecnologías avanzadas, lo que exacerba la brecha digital en la gestión del agua. Además, la necesidad de recopilar información sensible, incluidos los niveles de agua subterránea o los patrones de uso del agua, plantea inquietudes sobre la privacidad y la propiedad de los datos, lo que genera debates sobre la mejor manera de establecer protocolos de intercambio de datos transparentes y seguros (Kouhizadeh et al., 2021; Malik et al., 2021). Por lo tanto, el desafío es cómo ampliar las innovaciones tecnológicas de una manera que sea apropiada a las limitaciones locales, preserve la privacidad y mejore la capacidad técnica de las partes interesadas en regiones con escasez de datos (Kouhizadeh et al., 2021; Malik et al., 2021).

Métricas de sostenibilidad y resiliencia

Una tercera tendencia creciente es el uso de la sostenibilidad multidimensional y métricas de resiliencia para informar el desempeño del sistema hídrico (Saikia et al., 2022; Poulin y Kane, 2021). Para explicar no sólo la integridad ecológica, sino también el bienestar social, la vitalidad económica y la fortaleza institucional, los investigadores están involucrados en el diseño de índices de investigación (o compuestos) como puntuaciones de vulnerabilidad, cuadros de indicadores de resiliencia o índices de sostenibilidad del agua (Saikia et al., 2022; Poulin y Kane, 2021). Estas métricas

tienen por objeto proporcionar evaluaciones holísticas y pertinentes para las políticas de las condiciones de los recursos hídricos y los resultados de la gestión para informar sobre estrategias adaptativas y de largo plazo. (Sai-
kia et al., 2022; Poulin y Kane, 2021).

Una pregunta central de es si estas métricas en expansión deberían estandarizarse en regiones geográficas y culturalmente distintas y cómo hacerlo. Otros afirman que es necesario que sean universales. Se necesitan criterios que permitan un análisis y una evaluación comparativos globales (por ejemplo, centrar los resultados en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Syed, 2024; Krishnan et al., 2022; Slaimi, 2024). No obstante, múltiples críticos explican que los factores contextuales (como los sistemas tradicionales de derechos de agua, las prácticas indígenas y las características ecoecológicas únicas) hacen que una única métrica del agua sea potencialmente engañosa.

En virtud de esto, existe un movimiento hacia una métrica flexible: sistemas métricos que mantienen los indicadores globales fundamentales, pero permiten la adaptación local, garantizando al mismo tiempo que las complejidades socioecológicas estén representadas en las decisiones de gestión (Syed, 2024; Krishnan et al., 2022; Slaimi, 2024).

Conclusión

La síntesis de la simulación con la evaluación de impacto sirve como piedra angular en la GIRH, lo que, a su vez, mejora la comprensión multidimensional de los sistemas socioecológicos complejos. El análisis de escenarios con modelos de simulación, adaptados a la asignación de agua o a los parámetros socioeconómicos, puede ayudar a predecir cómo el desempeño del sistema puede variar con el cambio de las condiciones de entrada. Mientras tanto, en paralelo, las evaluaciones de impacto (por ejemplo, evaluaciones de impacto ambiental, evaluaciones ambientales estratégicas) son marcos estratégicos a través de los cuales los responsables de las políticas se guían por identificar las compensaciones y garantizar que se alcancen los objetivos de sostenibilidad. Estas dos herramientas se complementan entre sí reflejando

la visión cuantitativa y cualitativa del marco de toma de decisiones basado en evidencia.

Dentro de los antecedentes de los temas tratados, en primer lugar, se destaca la importancia de la colaboración multidisciplinaria, en segundo lugar, los participantes destacaron con frecuencia la importancia de la gestión del agua para las políticas, en la que hidrólogos, ecologistas, científicos sociales y responsables de la formulación de políticas aportaron información sobre los enfoques para la gestión del agua. En tercer lugar, se ha fomentado la participación de las partes interesadas, especialmente en los debates sobre la adaptación al cambio climático, la gobernanza de las aguas transfronterizas y la distribución equitativa de los recursos. Se considera un desafío y una oportunidad para mejorar la legitimidad y la eficacia de las decisiones de gestión del agua. Estos temas, que destacan la interconexión de la gestión del agua y el medio ambiente en la actualidad, apuntan a la necesidad de adaptación y compromiso entre los sectores interconectados. escalas de gobernanza.

Sin embargo, aunque el pensamiento es sistémico y complejo, los sistemas adaptativos brindan un buen marco conceptual básico, pero existen lagunas teóricas notables en las que los paradigmas tradicionales y los paradigmas emergentes aún no han convergido por completo. La literatura, por ejemplo, señala la necesidad de marcos conceptuales interdisciplinarios que integren mejor las dimensiones socioculturales en los sistemas hidrológicos o ecológicos. Además, consideraciones de equidad y justicia (es decir, cómo las decisiones sobre quién debe recibir recursos impactan a los marginados) también suelen ser no discutidos.

Metodológicamente, el desafío es la limitación de los datos y la complejidad de los modelos. Aunque estos modelos altamente sofisticados tienen información muy detallada, muchas veces no es de fácil acceso debido a la cantidad de conjuntos de datos que se requieren y los recursos computacionales necesarios, especialmente en entornos con escasez de datos. Además, muchas evaluaciones de impacto aún utilizan métodos o índices cualitativos obsoletos, lo que requiere una herramienta que combine información cuantitativa y cualitativa que refleje cambios dinámicos y espacialmente explícitos en los sistemas socioecológicos.

Geográficamente, la cobertura de la investigación es irregular, con estudios de casos que se inclinan hacia el mundo desarrollado y la falta de un análisis profundo del África subsahariana o de partes del sur de Asia y América Latina. De hecho, las comunidades marginadas (por ejemplo, asentamientos informales y grupos indígenas) suelen estar menos representadas tanto en los estudios de modelización como en las medidas de evaluación. El desequilibrio demográfico otorga una ventaja comparativa a la investigación global y dificulta que una investigación más localizada y contextualizada informe el contexto y las vulnerabilidades locales.

Para llenar los vacíos existentes en la metodología, es necesario que los investigadores miren hacia la IA y el ML en simulaciones predictivas. Estas técnicas avanzadas no sólo pueden mejorar el reconocimiento de patrones de alta resolución y las pruebas de escenarios, sino que también pueden ayudar significativamente a abordar la cuantificación de la incertidumbre, especialmente cuando se integra con datos de teledetección y sistemas de monitoreo basados en IoT.

Los sistemas de recursos hídricos son complejos y multidisciplinarios y requieren conocimientos de ingeniería y ecología, la economía, así como las ciencias sociales y los estudios de políticas, pueden fomentar la innovación y la investigación holística mediante consorcios de investigación y redes transdisciplinarias y garantizar que las dimensiones técnicas y humanas se aborden de manera proporcional, lo que es clave para desarrollar soluciones escalables y equitativas es una mejor comunicación y coproducción de conocimiento entre actores académicos, gubernamentales y comunitarios.

En la literatura actual se han publicado estudios longitudinales que siguen los cambios a largo plazo en la salud de las cuencas hidrográficas, el progreso socioeconómico y la gobernanza. En las próximas décadas, la eficacia proporcionaría una mejor comprensión de los impactos acumulativos y capacidades de adaptación. Esa investigación podría hacer uso de conjuntos de datos históricos y análisis geoespaciales para analizar la inflexión en las curvas para la disponibilidad de agua, la dinámica demográfica y la variabilidad climática.

Por último, la investigación más profunda en la integración de políticas es holística. En concreto, la investigación sobre instrumentos de política

efectiva, ajustes institucionales y sistemas de incentivos podría vislumbrar sobre la forma de abordar la integración de enfoques de mejores prácticas en la gobernanza a diferentes niveles. La investigación sobre la implicación de las partes interesadas, por ejemplo, es necesaria para implementar enfoques de mejores prácticas para la inclusión en la toma de decisiones, así como en la adopción de enfoques inclusivos y responsivos para comprometer a las comunidades locales. En conjunto, esta revisión de la literatura ha destacado la necesidad de una gestión integrada del agua y el medio ambiente para abordar problemas multifacéticos que difieren en alcance desde la variabilidad climática y la escasez de agua hasta la degradación de los ecosistemas.

Al reunir conocimientos adquiridos de la simulación y las prácticas de evaluación de impacto, la revisión abarca tendencias emergentes, debates en curso y lagunas críticas. Para informar sobre el mapa de posibilidades de investigación. En el futuro, los responsables de políticas, investigadores y profesionales deberían abogar por enfoques innovadores integrados basados en modelos, colaboración interdisciplinaria y participación inclusiva de las partes interesadas para promover resultados equitativos y sostenibles. Este esfuerzo exige compromisos concretos con el desarrollo de capacidad, gobernanza transparente de los datos y vigilancia a largo plazo para asegurarse de que las futuras políticas y programas sean adaptables, resilientes y aborden desafíos del agua y medio ambiente dinámicos.

Referencias

- Adom, A., Obaigbena, A., Ugwuanyi, E. D., Jacks, B. S., Umoga, U. J., Daraojimba, O. H. y Lottu, O. A. (2024). Integrated simulation frameworks for assessing the environmental impact of chemical pollutants in aquatic systems. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(2), 543-554. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i2.831>
- Adom, R. K. y Simatele, M. D. (2024). Overcoming systemic and institutional challenges in policy implementation in South Africa's water sector. *Sustainable Water Resources Management*, 10, 69. <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01040-3>
- Aivazidou, E., Banias, G., Lampridi, M., Vasileiadis, G., Anagnostis, A., Papageorgiou, E. y Bochtis, D. (2021). Smart technologies for sustainable water management: An urban analysis. *Sustainability*, 13(24), 13940. <https://doi.org/10.3390/su132413940>
- Azhoni, A., Holman, I. y Jude, S. (2024). Climate change adaptation attributes across

- scales and inter-institutional networks: Insights from national and state-level water management institutions in India. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 29(6), 57. <https://doi.org/10.1007/s11027-024-10156-y>
- Blasi, S., Ganzaroli, A. y De Noni, I. (2022). Smartening sustainable development in cities: Strengthening the theoretical linkage between smart cities and SDGs. *Sustainable Cities and Society*, 80, 103793. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103793>
- Dai, J. y Azhar, A. (2024). Collaborative governance in disaster management and sustainable development. *Public Administration and Development*, 44(4), 358-380. <https://doi.org/10.1002/pad.2071>
- Diefenderfer, H. L., Steyer, G. D., Harwell, M. C., LoSchiavo, A. J., Neckles, H. A., Burdick, D. M., ... y Twilley, R. R. (2021). Applying cumulative effects to strategically advance large-scale ecosystem restoration. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 19(2), 108-117. <https://doi.org/10.1002/fee.2274>
- Di Vaio, A., Trujillo, L., D'Amore, G. y Palladino, R. (2021). Water governance models for meeting sustainable development goals: A structured literature review. *Utilities Policy*, 72, 101255. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2021.101255>
- Fei, W., Opoku, A., Agyekum, K., Oppon, J. A., Ahmed, V., Chen, C. y Lok, K. L. (2021). The critical role of the construction industry in achieving the sustainable development goals (SDG): Delivering projects for the common good. *Sustainability*, 13(16), 9112. <https://doi.org/10.3390/su13169112>
- Hairam, N. P., Mekha, K. B., Suganthan, V. y Sudhakar, K. (2023). Sustainalism: An integrated socio-economic-environmental model to address sustainable development and sustainability. *Sustainability*, 15(13), 10682. <https://doi.org/10.3390/su151310682>
- Ishaque, W., Mukhtar, M. y Tanvir, R. (2023). Pakistan's water resource management: Ensuring water security for sustainable development. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1096747. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1096747>
- Jacob, D. E., Nelson, I. U. y Izah, S. C. (2024). Indigenous water management strategies in the Global South. En *Water crises and sustainable management in the Global South* (pp. 487-525). Springer Nature Singapore.
- Jain, S. K. y Singh, V. P. (2023). *Water resources systems planning and management*. Elsevier.
- Kaiser, R. A., Taing, L. y Bhatia, H. (2022). Antimicrobial resistance and environmental health: A water stewardship framework for global and national action. *Antibiotics*, 11(1), 63. <https://doi.org/10.3390/antibiotics11010063>
- Kamyab, H., Khademi, T., Chelliapan, S., Saberi Kamarposhti, M., Rezanian, S., Yusuf, M. y Ahn, Y. (2023). The latest innovative avenues for the utilization of artificial intelligence and big data analytics in water resource management. *Results in Engineering*, 101566. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101566>
- Kouhizadeh, M., Saberi, S. y Sarkis, J. (2021). Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers. *International Journal of Production Economics*, 231, 107831. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107831>
- Krishnan, S. R., Nallakuruppan, M. K., Chengoden, R., Koppu, S., Iyapparaja, M., Sadhasi-

- vam, J. y Sethuraman, S. (2022). Smart water resource management using artificial intelligence: A review. *Sustainability*, 14(20), 13384. <https://doi.org/10.3390/su142013384>
- Li, M., Cao, X., Liu, D., Fu, Q., Li, T. y Shang, R. (2022). Sustainable management of agricultural water and land resources under changing climate and socio-economic conditions: A multi-dimensional optimization approach. *Agricultural Water Management*, 259, 107235. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107235>
- Malik, S., Chadhar, M., Vatanasakdakul, S. y Chetty, M. (2021). Factors affecting the organizational adoption of blockchain technology: Extending the technology-organization-environment (TOE) framework in the Australian context. *Sustainability*, 13(16), 9404. <https://doi.org/10.3390/su13169404>
- Marqués, A. C., Veras, C. E. y Rodríguez, D. A. (2022). Assessment of water policies contributions for sustainable water resources management under climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 608, 127690. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127690>
- Mishra, B. K., Kumar, P., Saraswat, C., Chakraborty, S. y Gautam, A. (2021). Water security in a changing environment: Concept, challenges and solutions. *Water*, 13(4), 490. <https://doi.org/10.3390/w13040490>
- Moss, E., Watkins, E. A., Singh, R., Elish, M. C. y Metcalf, J. (2021). Assembling accountability: *Algorithmic impact assessment for the public interest*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3877437>
- Nagata, K., Shoji, I., Arima, T., Otsuka, T., Kato, K., Matsubayashi, M. y Omura, M. (2022). Practicality of integrated water resources management (IWRM) in different contexts. *International Journal of Water Resources Development*, 38(5), 897-919. <https://doi.org/10.1080/07900627.2021.1921709>
- Ntona, M. M., Busico, G., Mastrocicco, M. y Kazakis, N. (2022). Modeling groundwater and surface water interaction: An overview of current status and future challenges. *Science of the Total Environment*, 846, 157355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157355>
- Obaideen, K., Shehata, N., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Mahmoud, M. S. y Olabi, A. G. (2022). The role of wastewater treatment in achieving Sustainable Development Goals (SDG) and sustainability guideline. *Energy Nexus*, 7, 100112. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112>
- Ofori, A. D. y Mdee, A. (2022). Integrated water resource management. En W. Leal Filho, A. M. Azul, L. Brandli, A. Lange Salvia y T. Wall (Eds.), *Clean water and sanitation: Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95846-0_4
- Ortiz-Partida, J. P., Fernández-Bou, A. S., Maskey, M., Rodríguez-Flores, J. M., Medellín-Azuara, J., Sandoval-Solis, S. y Kahil, T. (2023). Hydro-economic modeling of water resources management challenges: Current applications and future directions. *Water Economics and Policy*, 9(01), e2340003. <https://doi.org/10.1142/S2382624X23400039>
- Poulin, C. y Kane, M. B. (2021). Infrastructure resilience curves: Performance measures

- and summary metrics. *Reliability Engineering & System Safety*, 216, 107926. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107926>
- Sahoo, S. y Goswami, S. (2024). Theoretical framework for assessing the economic and environmental impact of water pollution: A detailed study on sustainable development of India. *Journal of Future Sustainability*, 4(1), 23-34. <https://doi.org/10.5267/j.jfs.2024.1.003>
- Saiu, V., Blečić, I. y Meloni, I. (2022). Making sustainability development goals (SDG) operational at suburban level: Potentials and limitations of neighbourhood sustainability assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review*, 96, 106845. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106845>
- Saikia, P., Beane, G., Garriga, R. G., Avello, P., Ellis, L., Fisher, S. y Jiménez, A. (2022). City water resilience framework: A governance-based planning tool to enhance urban water resilience. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103497. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103497>
- Salahshoori, I., Wang, Q., Nobre, M. A., Mohammadi, A. H., Dawi, E. A. y Khonakdar y H. A. (2024). Molecular simulation-based insights into dye pollutant adsorption: A perspective review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 103281. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103281>
- Scanlon, B. R., Fakhreddine, S., Rateb, A., de Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., ... y Zheng, C. (2023). Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(2), 87-101. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00418-9>
- Sigalla, O. Z., Tumbo, M. y Joseph, J. (2021). Multi-stakeholder platform in water resources management: A critical analysis of stakeholders' participation for sustainable water resources. *Sustainability*, 13(16), 9260. <https://doi.org/10.3390/su13169260>
- Siqueira-Gay, J., Metzger, J. P., Sánchez, L. E. y Sonter, L. J. (2022). Strategic planning to mitigate mining impacts on protected areas in the Brazilian Amazon. *Nature Sustainability*, 5(10), 853-860. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00921-9>
- Slaimi, A. (2024). *A meta-learning approach for hydrological time series model selection* [disertación doctoral]. Dublin City University. <https://doras.dcu.ie/30253/>
- Smith, M. D., Sikka, A., Taguta, C., Dirwai, T. L. y Mabhaudhi, T. (2024). Embracing complexities in agricultural water management through nexus planning. *Irrigation and Drainage*, 73(5), 1695-1716. <https://doi.org/10.1002/ird.3041>
- Srivastav, A. L., Dhyani, R., Ranjan, M., Madhav, S. y Sillanpää, M. (2021). Climate-resilient strategies for sustainable management of water resources and agriculture. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31), 41576-41595. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14332-4>
- Syed, T. (2024). *Reframing scale issues in transboundary water governance scale-descale-rescale analysis of policy design and implementation* [disertación doctoral]. Tufts University. <https://www.proquest.com/openview/57228fe8fcdde0a9b15c5cfa6ae-1768c/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Velásquez, L. S. (2021). Agenda 21: A form of joint environmental management in

- Manizales, Colombia. En *The earthscan reader in sustainable cities* (pp. 293-320). Routledge.
- Vo, K., Sarkar, M., White, P. J. y Yuriev, E. (2025). Metacognitive problem solving: Exploration of students' perspectives through the lens of multi-dimensional engagement. *Chemistry Education Research and Practice*, (26), 141-157. <https://doi.org/10.1039/d4rp00096j>
- Wang, X. C., Jiang, P. yang, L., Van Fan, Y., Klemeš, J. J. y Wang, Y. (2021). Extended water-energy nexus contribution to environmentally related sustainable development goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111485. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111485>
- Yap, J. y McLellan, B. (2024). Exploring transitions to a hydrogen economy: Quantitative insights from an expert survey. *International Journal of Hydrogen Energy*, 66, 371-386. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.213>
- Zhao, Y., Price, M. y Trowsdale, S. (2022). Comparison of the transition to more sustainable stormwater management in China and the USA. *Water*, 14(12), 1960. <https://doi.org/10.3390/w14121960>

8. La hoja de ruta hacia la descarbonización de la industria del cemento en México



J. AURELIO COLMENERO ROBLES*

MIGUEL ALVARADO CARDONA**

OBED PARDO SANTOS***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.08>

Resumen

El cemento es un producto primordial para el desarrollo de muchos países, debido a que es utilizado en la mayoría de las construcciones civiles como aeropuertos, puentes, carreteras, fábricas, viviendas, entre otras obras. Los impactos ambientales generados por la operación de plantas productoras de cemento han propiciado el surgimiento de movimientos sociales alrededor del mundo, que reivindican la lucha por el derecho a un medio ambiente sano, la defensa del territorio, sus recursos y las formas de vida tradicionales de la población. Entre las prioridades de la industria del cemento está llevar a cabo estrategias sostenibles e innovadoras más eficientes para reducir emisiones de NO_x , SO_x , CO_2 , polvos de SiO_2 y otros elementos tóxicos a fin de mejorar la competitividad de esta actividad industrial. Esta nueva visión deberá contemplar: 1) mejorar la eficiencia energética, cambiar a combustibles alternativos (combustibles carbono neto cero), 2) reducir la relación de *clinker* a cemento e integrar la captura de carbono en la producción de cemento como el eje principal de mitigación de carbono en este

* Licenciado en Biología. Analista en la Secretaría del Investigaciones y Posgrado de Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4959-7963>

** Maestro en Ciencias. Profesor del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9747-260X>

*** Maestro en Administración y Políticas Públicas. Investigador en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4341-9368>

sector industrial y 3) priorizar las alternativas de producción del cemento, a fin de no afectar el medio ambiente y la salud humana.

Palabras clave: *industria limpia, reducción de CO₂, cambio climático, competitividad industrial, innovación tecnológica.*

Introducción

La historia del uso de conglomerantes y cemento Portland

La historia de los conglomerantes y cementos en la construcción se remonta a los tiempos de Egipto, Grecia y Roma. Las construcciones de esas civilizaciones y hasta mediados del siglo XVIII empleaban la cal como conglomerante. El gran personaje Vitrubio, en su tratado de arquitectura publicado en el siglo I antes de Cristo, da a conocer una dosificación de un “cemento romano” que se obtenía mezclando dos partes de puzolana y una parte de cal apagada. Las puzolanas procedían de las cenizas volcánicas que se encontraban al pie del Vesubio en la región Pozzuoli de donde proviene el término puzolana (Sanjuán y Menchón, 2014). Con el cemento romano se construyeron obras importantes, entre las que destaca el Foro Romano y el Panteón de Roma (27 a. C.). En la construcción se utilizó una mezcla de cal, agua, piedras, arena y ladrillos (Sanjuán y Chinchón, 2014).

Situación similar ocurrió hace unos 1500 años en la civilización china, en la que se ha descubierto la utilización del arroz como un tipo de mortero. En la civilización maya se han encontrado vestigios de la utilización de un elemento cementante bastante similar al cemento actual. En el siglo XVIII, el ingeniero John Smeaton, en 1758, aceptó reconstruir el Faro de Eddystone con un material resistente al viento, al fuego y al oleaje. Así empezó a investigar diferentes mezclas de mortero, hasta desarrollar un cemento hidráulico. Sin embargo, los ingleses James Parker y Joseph Aspdin, cuyo producto se obtuvo de la combustión conjunta de caliza y carbón, lo denominaron cemento Portland por su color oscuro, similar a la piedra de la isla de Portland del condado de Dorset. Este nuevo material lo patentaron en 1824 (Díaz, 2012).

En 1845, el británico Isaac Johnson —otro de los pioneros de la producción de cemento— calentó rocas calizas y arcilla hasta los 1 400 o 1 500 °C muy por arriba de lo que hizo Aspdin, con lo que consiguió llevar la mezcla al proceso químico llamado clinkerización, produciendo así la base del cemento que hoy conocemos. Aproximadamente, en 1855 se construyeron las primeras plantas productoras de cemento fuera de Inglaterra; se erigieron en Bélgica y Alemania. Estados Unidos inició la importación de cemento europeo a finales de 1860, pero en 1871, construyó la primera planta de cemento en Coplay, Pensilvania. El cemento generado por esta fábrica presentó propiedades deficientes en un inicio, sin embargo, fue mejorando su calidad de producción hacia 1900.

En 1873 se tuvo un gran avance en la capacidad de producción de cemento, gracias a una versión mejorada del horno rotatorio patentada por el inglés F. Ransome, que permitió una producción continua. A partir de 1900, los hornos rotatorios reemplazaron rápidamente a los hornos verticales porque la transferencia de calor por radiación era más eficiente y lograron que las altas temperaturas fueran uniformes para la clinkerización, lo que produjo cementos más resistentes. Posterior a la producción del *clínker*, se empleaba el molino de bolas para tritarlo y luego se agregaba yeso a la mezcla resultante para retardar el proceso de fraguado. En 1902, Thomas Alva Edison desarrolló los primeros hornos rotatorios de alta capacidad.

El cemento en la época más contemporánea es un conglomerante hidráulico de un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. Los conglomerantes hidráulicos, el cemento Portland y sus derivados son los más empleados en la construcción debido a estar formados, básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y yeso, que son minerales muy abundantes en la naturaleza con costos relativamente bajos en su extracción (Polanco, Diego y Tomas, s/f). El cemento también tiene la propiedad de unir fragmentos sólidos para formar un material resistente y duradero (Jaimes y Montaña, 2022).

Este producto no sólo es impulsor de industrias sino también fuente de una demanda para los servicios y productos de otras industrias, como las empresas de transportes, las suministradoras de combustible y energía eléc-

trica, las proveedoras de sacos para envasar cemento y las productoras de maquinaria para el transporte (figura 8.1) (Nájera, 2002).

Figura 8.1. *Planta de manufacturación de cemento*



Fuente: Kunak (2022).

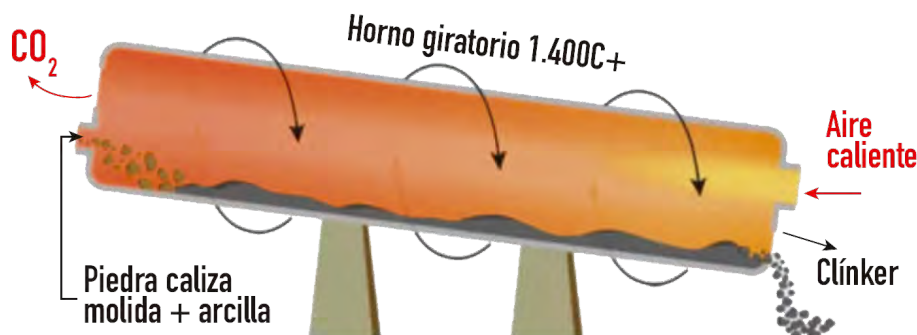
El proceso de fabricación del cemento Portland

La producción a nivel industrial

El proceso de elaboración del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclarla minuciosamente en una cierta proporción y calcinarla en un horno rotatorio de gran dimensión, a una temperatura de 1 300 a 1 400 °C, bajo la cual el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando bolas conocidas como *clínker*. El método de fabricación a seguir depende, además, de la naturaleza de las materias primas usadas. El proceso se realiza en tres etapas.

1ª etapa: Preparación de las materias primas. La extracción de las materias primas naturales se hace en canteras, normalmente, a cielo abierto próximas a la planta procesadora (caliza, marga y arcilla). Las operaciones de extracción incluyen perforación de rocas, explotación por dinamita, excavaciones, acarreo y trituración. Después de la trituración primaria, las materias primas se transportan a la planta de cemento para su almacenamiento y homogeneización. Se distinguen cuatro tipos de procesos de fabricación, en función de cómo se procesa el material antes de la entrada en el horno de *clínker*: vía seca, vía semiseca, vía semihúmeda o vía húmeda. La alimentación al horno se realiza a través del precalentado de ciclones de la materia prima para facilitar su cocción.

2ª etapa: Cocción del *clínker*. Uno de los componentes esenciales en la producción del cemento mediante el cocimiento como caliza cocida, pues en las operaciones de las plantas cementeras se desprenden partículas fugitivas de polvo y gases que contienen metales pesados como plomo, cadmio, arsénico y mercurio, además de los que se emiten por la chimenea (Storey y Colina, 2016). La química básica del proceso de la fabricación del cemento empieza con la descomposición del carbonato cálcico (CaCO_3) a altas temperaturas formando óxido cálcico (CaO) y liberando dióxido de carbono (CO_2) (figura 8.2). Sigue el proceso de clinkerización en el que el óxido de calcio reacciona a alta temperatura (1 400-1 500 °C) con óxido de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3) para formar los silicatos, aluminatos y ferritos de calcio que componen el *clínker* (Sanjuán y Chinchón, 2014).

Figura 8.2. Generación de CO_2 en el horno rotatorio

Fuente: adaptado de Carro Suárez (2022, p. 31).

El combustible inyectado a través del quemador principal (mechero), produce la llama principal (temperatura de llama de unos 2 000 °C) el tamaño se ajusta mediante la regulación del aire primario (10-15% del total del aire de combustión) que se introduce por multicanales situados alrededor de la boquilla inyectora de combustible y aire secundario en el quemador principal (Sanjuán y Chinchón, 2014). En el caso de utilizar carbón/coque de petróleo como combustible, se puede alimentar directa o indirectamente. El combustible pulverizado se inyecta directamente dentro del horno con el aire del molino (aire primario). La alimentación indirecta tiene como desventaja las pérdidas de calor del horno, que están alrededor de 200-250 MJ/tonelada de clínker (6 a 8% más alto que en los hornos modernos), por eso no se utiliza actualmente (Sanjuán y Chinchón, 2014).

3ª etapa: Molienda. El material obtenido en la etapa anterior es enfriado a una temperatura cercana a los 90 °C, a continuación es mezclado con coadyuvantes, por ejemplo, el yeso, para dar como producto final el cemento; posteriormente, este material es empacado para su venta. El cemento tipo Portland como producto final presenta una composición química promedio que está determinada por la mezcla de componentes a partir del tipo y cantidad de materias primas. Los elementos se originan a partir de distintas reacciones en el interior de los hornos de cocción. Las calizas y margas

proporcionan el calcio. Las arcillas, esquistos y otros materiales aportan el sílice, hierro y aluminio. El contenido de los elementos restantes proviene de las mismas materias, pero en menor proporción (tabla 8.1) (Romo, Romero y Samaniego, 2005).

Tabla 8.1. *Composición promedio del cemento tipo Portland*

<i>Compuesto</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Porcentaje</i>
Sílice	SiO ₂	21.92
Alúmina	Al ₂ O ₃	6.91
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	2.91
Óxido de calcio	CaO	62.92
Oxido de magnesio	MgO	2.54
Trióxido de azufre	SO ₃	1.72
Álcalis de R ₂ O ₃	R ₂ O ₃	0.82
Pérdida de combustible	*	(1.5)
Residuos insolubles	*	0.20

Fuente: Romo et al. (2005).

En términos de peso, se emiten aproximadamente 5 kg de NO_x y SO₂, 50 kg de H₂O, 250 kg de O₂, 700-900 kg de CO₂ y 1 550 kg de N₂ como subproductos por tonelada de cemento (Appadurai, s/f; Flores, 2003). A futuro los procesos modernos en la Unión Europea sobre la producción de un kilo de cemento se espera que solo generen 500 kg de CO₂ (Marmier, 2023).

La producción del cemento en el mundo

La producción de cemento está relacionada directamente con el desarrollo de cada país, ya que es uno de los materiales que en mayor o menor grado ha contribuido a conformar el perfil actual de las ciudades y multitud de grandes vías de comunicación (Nájera, 2002). Un importante porcentaje de productores de cemento se concentra en los países de Asia, otra fracción pertenece a Norteamérica, Europa, África del Norte y otros países de Latinoamérica (Flores, 2003). La producción del cemento es una actividad alrededor del mundo en la cual predominan las grandes empresas multinacionales cuya producción promedio oscila en los 4 millones de toneladas al

año (tabla 8.2). El envasado permite resolver la restricción peso-volumen que presenta el transporte de cemento, de modo que se favorece la ampliación del comercio más allá de lo local. México ocupa una posición relevante en el contexto global como país productor (Vera, 2013). En lo referente al comercio internacional la vía marítima ofrece una alternativa de transporte más económica en ambos sentidos de los países entre Asia, Europa y América. El comercio vía terrestre también ofrece sus ventajas; se trasporta vía ferrocarril (Vera, 2017). La producción para el sector de la construcción representa una fuerte actividad económica que beneficia a miles de trabajadores en varios países del mundo (El-Sayed et al., 2020).

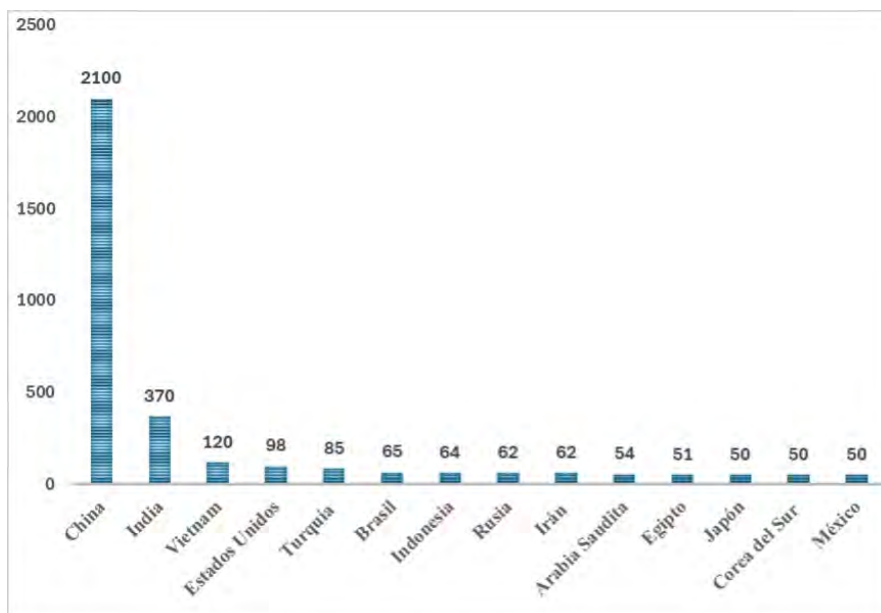
Tabla 8.2. *Cifras de producción mundial de cemento*

<i>Producción de cemento en el mundo (años / millones de toneladas métricas)</i>											
<i>2011</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>	<i>2014</i>	<i>2015</i>	<i>2016</i>	<i>2017</i>	<i>2018</i>	<i>2019</i>	<i>2020</i>	<i>2021</i>	<i>2022</i>
3.60	3.70	4.08	4.18	4.10	4.20	4.05	4.10	4.10	4.20	4.40	4.10

Fuente: Ige et al. (2024, p. 580).

Los estudios del Servicio Geológico de Estados Unidos y la Asociación Europea del Cemento resalta que China es el mayor productor de cemento con un poco más del 52% de la producción mundial, seguido de la India (7.0%), la Unión Europea (6.1%), Estados Unidos (2.1%) y el resto de los países con (27.6%). La producción de China produjo la cantidad de 2 100 millones de toneladas en 2022 al superar a cualquier de los otros países por un margen significativo. Esto significó que China logró más del 50% de la producción mundial del cemento. La India fue el segundo mayor productor de cemento del mundo con una producción de 370 millones de toneladas. Vietnam ocupó el tercer lugar, con una producción de 120 millones de toneladas. En este mismo año, Estados Unidos produjo aproximadamente 95 millones de toneladas y ocupó el cuarto entre los principales productores a nivel mundial. México se posicionó en el número 14 de la producción mundial (figura 8.3) (Ige et al., 2024).

Figura 8.3. Los países con mayor producción de cemento



Fuente: adaptado de Ige et al. (2024, p. 581).

Los efectos adversos de la producción del cemento en la sociedad

A pesar del gran impacto económico que representa la explotación de la materia prima para la industria cementera se menciona con poca frecuencia. A pesar del cumplimiento de la normatividad ambiental que exige cada país, la extracción conlleva graves impactos al medio físico, al medio biótico y a la sociedad (SE, 2013). Las enormes cantidades de materia prima necesaria para su transformación conlleva a la afectación del paisaje (Mendoza y Urbina, 2017), deforestación de la vegetación y la alteración de sitios del hábitat de la fauna (Díez, 2019). A consecuencia de la trituración de esa materia prima se genera grandes cantidades de polvos que llegan a los poblados cercanos con un alto riesgo de afectar la salud de sus habitantes. Para las comunidades cercanas causa divisiones entre

sus habitantes para quienes estas a favor o aquellos que se oponen a este tipo de actividad (Ventura, 2019).

Los riesgos de la emisión de los componentes químicos en la producción del cemento en la salud humana

Los efectos nocivos potenciales que generan los *combustibles derivados de residuos* (CDR) y las propias materias primas liberados durante el procesamiento del *clínker*, tanto para el ambiente como para la salud humana, efectos que han despertado gran interés sobre los efectos que causan, especialmente por parte de los grupos ecologistas, científicos especializados en el área, centros de investigación de universidades y empresas socialmente responsables (tabla 8.3) (Storey y Colina, 2016). En esta fase de la producción se generan grandes cantidades de gases de efecto invernadero, como el monóxido de carbono (CO), otros contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO), dióxido de azufre (SO₂), cloruros y fluoruros, emisiones de COV. Así como distintos metales pesados (Pb, Cd, Pb, As, Cr, Cu, Ni, Se y Zn); así como partículas en suspensión (PM_{2.5}, PM₁₀) con un daño potencial a la calidad del aire y graves daños salud de las personas (EMEP/EEA, 2016; SEE, 2017).

Tabla 8.3. *Principales contaminantes con efectos a la salud*

<i>Contaminante proveniente de la producción de cemento</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Afectación a la salud humana y medio ambiente</i>
<i>Óxidos de nitrógeno</i>	(NO _x)	Irritación del sistema respiratorio, reducción de la función pulmonar, agravamiento de las alergias respiratorias y del asma, lesiona las células mucosas que cubren el interior de los pulmones, empeoramiento de las enfermedades respiratorias crónicas. Forma parte de la lluvia ácida que afecta la fertilidad de los terrenos, la vegetación y los ecosistemas acuáticos.
<i>Óxidos de azufre</i>	(SO _x)	Irritaciones oculares y vías respiratorias, rinitis, sinusitis, laringitis, bronquitis agudas y crónicas y bronquiolitis, desarrollo de asma y alergias respiratorias. Origina la lluvia ácida.
<i>Monóxido de carbono</i>	CO	Las personas que inhalan este peligroso gas pueden experimentar síntomas como: dolor de cabeza, mareo, agotamiento físico, náuseas, irritabilidad, confusión, pérdida de conciencia, daños neurológicos, trastornos sensoriales y motores.
<i>Dióxido de carbono</i>	CO ₂	El CO ₂ desplaza el oxígeno cuando se encuentra en concentraciones superiores a los 30.000 ppm, lo que puede provocar asfixia, falta de concentración, dolores de cabeza, somnolencia, problemas respiratorios y mareo.
<i>Partículas suspendidas</i>		Las partículas finas aisladas o en combinación con otros contaminantes pueden provocar muertes prematuras, agravamiento de crisis asmática, tos persistente, dificultad respiratoria, dolor al respirar, bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar.
<i>Dioxinas y furanos</i>		Cáncer, alteraciones neurológicas, hepáticas, inmunológicas, disfunciones hormonales, esterilidad, endometriosis, alteraciones cutáneas, entre otros.

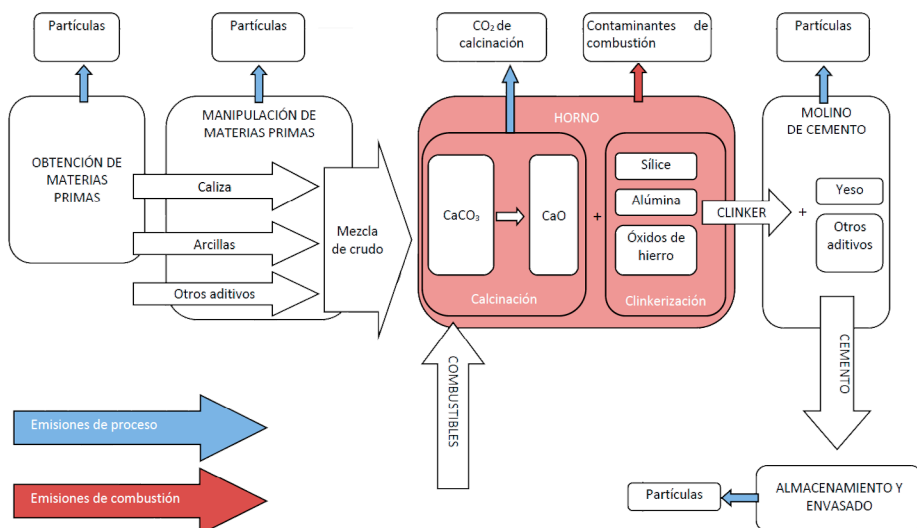
<i>Contaminante proveniente de la producción de cemento</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Afectación a la salud humana y medio ambiente</i>
<i>Metales y sus compuestos</i>	Talio (T)	Tóxico por ingestión, inhalación y absorción cutánea, afecta al sistema nervioso, genera sensibilidad cutánea y es bioacumulativo, a bajas dosis puede interactuar con el sistema enzimático y los neurotransmisores. Altamente tóxico para los organismos acuáticos, de alta movilidad en el suelo.
	Cadmio (Cd)	Irritación bronquial y pulmonar, disminución de la función pulmonar, disminución de la filtración urinaria proteinuria y litiasis renal, efectos reproductivos como bajo peso, crecimiento intrauterino retardado, riesgo de cáncer de pulmón.
	Plomo (Pb)	Bioacumulativo, dolor abdominal, vómitos, diarrea y en exposición grave muerte por envenenamiento, toxicidad en la sangre, disminución de las capacidades sensoriales y motoras, retraso en el crecimiento de los niños, toxicidad renal, alteración en la presión sanguínea, efectos reproductivos como disminución de los espermatozoides y el volumen del semen, incrementa los abortos y retraso físico y mental de los lactantes.
	Mercurio (Hg)	Bioacumulativo con gran persistencia medioambiental, sus efectos son afectaciones gastrointestinales, respiratorias y al sistema nervioso central como alteraciones visuales, ceguera, sordera, disminución de la conciencia, alucinaciones, delirio, tendencias suicidas y muerte. En sus efectos crónicos provoca alteraciones neurológicas y lesiones renales. Afectaciones reproductivas como abortos y malformaciones en los niños.
	Arsénico (As)	La vía de absorción puede ser a través de la piel, en el caso de ser ingerido se deposita en el tracto respiratorio. Se acumula también en hígado, riñón, pelo, dientes y uñas. Provoca carcinogénesis en piel y pulmón.
	Cromo (Cr)	Los compuestos de cromo pueden ingresar al organismo humano por exposición accidental o causar daño por exposición crónica y dañar diversos sistemas. Cuando los compuestos de cromo se ingieren por largo tiempo causan irritación, úlceras, hepatitis, nefritis y coloración amarilla de los dientes. En los ojos expuestos se observa conjuntivitis, lagrimeo y dolor.
	Zinc (Zn)	Un exceso en la ingesta de zinc, afecta a todos los mamíferos, ya que, genera trastornos neurológicos, hematológicos, inmunológicos, daños renales, afectaciones hepáticas, cardiovasculares y afecciones genotóxicas.
	Níquel (Ni)	Causa mareos, fallos respiratorios, embolia de pulmón, asma, defectos de nacimiento desordenes del corazón bronquitis crónica, alergias. La exposición al níquel puede desarrollar cáncer de laringe, próstata, nariz y pulmón.

Fuentes: Aguilar (2023, p. 34.), Albert (2008, pp. 171, 185) y Carrasco y Tadeo (2014-2015, p. 5).

Las fases de producción que generan emisiones de CO₂ de efecto invernadero de la industria del cemento

Una veintena de empresas a nivel mundial entre las que sobresalen las productoras de petróleo, gas, carbón y cemento fueron responsables en el año 2023 del 40.8% de las emisiones globales sumando 17.5 gigatoneladas de dióxido de carbono (CO₂). Además, 16 de esas 20 son compañías públicas (estatales). Entre todas destacan las empresas de China, con un aporte del 23% de CO₂ (Planelles, 2025). Las industrias del cemento a nivel mundial son un sector que genera enormes cantidades de CO₂. Las emisiones de CO₂ en la industria cementera provienen principalmente de la combustión directa de combustibles fósiles y de la calcinación de la piedra caliza en óxido de calcio ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). Una cantidad indirecta de CO₂ proviene del consumo de electricidad obtenida de la quema de combustibles fósiles (figura 8.4). Este sector ha emitido 1.8 gigatoneladas de CO₂ anuales en 2011 (Ali et al., 2011). En el año 2019 generó 2.4 gigatoneladas de CO₂ (Ige et al., 2024).

Figura 8.4. La liberación de CO₂ a lo largo del ciclo de producción de cemento

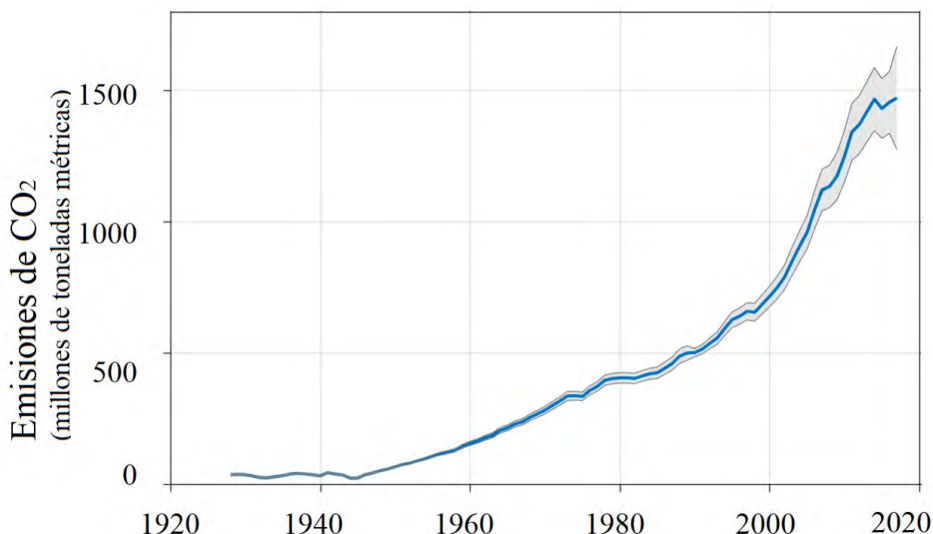


Fuente: adaptado de SEIE (2017, p. 1).

Las emisiones históricas de CO₂ por la industria del cemento

La industria del cemento contribuye aproximadamente con el 5% de las emisiones de CO₂ antropogénico a nivel global. Sin embargo, se ha documentado que los niveles se han elevado de hasta el 7% (Fennell, Davis, Mohammed, 2021). Del CO₂ emitido, el 50% corresponde en gran parte de la industria del cemento como resultado de la combustión de las distintas fuentes de combustibles (carbón, coque, neumáticos, aceites usados, solventes, lodos de plantas de tratadoras de aguas y otras fuentes). El 5% producto del transporte y un 5% adicional de la electricidad en las operaciones de manufactura (Bosoaga et al., 2009). Pero estimaciones más recientes indican que la característica especial de esta industria es el hecho de que aproximadamente dos tercios del CO₂ emitido se generan a partir de las reacciones químicas involucradas en la conversión de la piedra caliza en óxido de calcio, precursor de la formación del *clinker* y una tercera parte se emite por el consumo de combustibles fósiles y el resto generado por otras fases de operación (Cavalett et al., 2022).

Los registros históricos fueron elaborados por Andrew (2018) a pesar de las escasas bases de datos del registro de CO₂ del mundo. En la gráfica de la figura 8.5 se observan tres periodos de las emisiones de este sector. En el registro del año 1928 a la década de 1980 se mantuvieron por debajo de 500 millones de toneladas de CO₂. En las siguientes décadas, de casi 1990 a la década de 2016, se aprecia un incremento que se elevan a las 1 000 millones toneladas métricas. El último periodo, hasta 2018, la cifra de emisiones se incrementa a la cantidad de 1 500 millones de toneladas métricas de CO₂.

Figura 8.5. Comportamiento mundial de emisión de CO₂ durante el periodo de 1928 a 2018

Fuente: adaptado de Andrew (2018, p. 198).

La historia de la fabricación del cemento en México

Los inicios

En el año de 1887 es el primer ejemplo de la Compañía Manufacturera de Cal Hidráulica para producir cal y cemento, se instaló San Lorenzo de Tula, Hidalgo. Sin embargo, al no lograr la suficiente calidad de sus productos no logró prosperar. Los hermanos Enrique y Jorge Gibbon, hijos del empresario británico Henry J. Gibbon asentado en el país, adquirieron en 1882 la patente exclusiva para fabricar cemento Portland. En 1890 fundaron en Londres la Mexican Portland Cement Company y en nuestro país rentaron gran parte de la Hacienda de Denyi y el molino de Jasso, para establecer su fábrica. La inauguración de la planta fue a fines de 1893, pero debido a que el cemento no alcanzó la calidad requerida para el mercado local, la empresa quebró a un año de su apertura (Santa Ana y Santa Ana, 2020). Un nuevo intento de producción sucedió en 1895 al asociarse con G. Watson para

abrir una nueva planta denominada Fábrica de Buena Vista, con la cual obtuvieron contratos con el gobierno del Ayuntamiento de la Ciudad de México en 1897: debido a que nuevamente el producto no alcanzó los estándares requeridos no les fue posible cerrar los contratos y la compañía se disolvió en 1899. Hasta el año de 1900 el cemento aún no se producía en México el cual se importaba desde Europa. En 1905 los señores Watson y Gibbon se fusionaron con la Sociedad Pimentel, formando la Compañía Manufacturera de Cemento Portland (Santa Ana y Santa Ana, 2020). En el norte de nuestro país se fundó en 1906 la primera empresa productora de cemento con el nombre de la Fábrica de Cementos y Productos Refractarios en la ciudad de Monterrey. Entre los años de 1906 y 1907 se establecieron las fábricas de cemento en Gómez Palacio, Durango y en San Nicolás Hidalgo, Nuevo León. En Hidalgo, al centro del país, se creó la Compañía Manufacturera de Cemento Portland “La Cruz Azul” en Jasso y la fábrica de Cementos Tolteca en Tula (Nájera 2002, Santa Ana y Santa Ana, 2020). Al año de 1911, se consumían al año 75 000 toneladas de cemento, y tal demanda decreció durante la Revolución.

Posterior a la Revolución, en la década de 1920, restablecida la paz, las empresas existentes en el país habían reanudado sus operaciones y normalizado sus actividades; se crearon también Cementos Landa y Cementos Monterrey (Nájera, 2002). Para 1946 había en México seis empresas dedicadas a la fabricación de cemento; tres en el estado de Hidalgo, una en Monterrey, una en Puebla y la de Apaxco en el Estado de México. En el año 1951, con un equipo capaz de manufacturar 2.2 millones de toneladas, la industria nacional sólo logró producir 1.5 millones de toneladas (Nájera, 2002). La capacidad de producción industrial, en el año 1996, llegó a la cantidad de 44 millones de toneladas y justamente hacia el año de 1999 alcanzó la cifra de 46 millones de toneladas; al año 2001 se presenta una caída de 32.1 toneladas a consecuencia de la desaceleración económica de Estados Unidos y por la contracción de la industria de la construcción. Actualmente la industria nacional del cemento tiene presencia en al menos 30 plantas distribuidas en 17 entidades federativas y 33 plantas en el extranjero, distribuidas en Estados Unidos, España, Colombia, Filipinas, Costa Rica y otras naciones (Romo et al., 2005).

En el contexto económico, la industria mexicana del cemento es una de las más importantes por su capacidad productiva. A lo largo de los años ha tenido severas fluctuaciones en sus niveles de producción. El mayor impulso de esta industria ocurrió durante la época de industrialización por sustitución de importaciones que promovía la producción nacional a través de incentivos fiscales y apoyos financieros. La industria pasó de contar con una capacidad instalada de 574 millones a 17.02 millones de toneladas métricas en el periodo 1940-1980 (Salomón, 2006, citado por Vásquez y Corrales, 2017). En el año 2006 el valor de la producción aumentó 5.8% en términos reales. Sin embargo, hay un momento crítico entre 2009 y 2010 cuando se registraron fuertes caídas en la producción y en consecuencia sólo se logró el 52.4% en las exportaciones. Es comprensible que la crisis financiera desatada por Estados Unidos en el 2008 tuviera fuertes repercusiones en la economía mexicana y en particular en la industria cementera (Vásquez y Corrales, 2017).

Las emisiones de CO₂ de la industria del cemento en México.

Las cementeras contaminan el aire, el agua, el suelo y los organismos vivos. A pesar de los cambios tecnológicos que se fueron incorporando a los procesos (hornos rotativos y procesos húmedos en 1895), como los precalentadores de suspensión en la década de 1930 y los precalentadores con cuatro etapas ciclónicas durante la década de 1970. En esta misma época ya existía una gran variedad de plantas, incluidas las híbridas. Otras causas de la contaminación consistían en las deficiencias técnicas debido al inadecuado mantenimiento, constantes fallas técnicas, cortes en el suministro de combustible y fallas de procedimientos; por estas condiciones inherentes a los procesos de producción, los efectos de la contaminación siempre han estado presentes (Carrasco y Tadeo, 2016). Los registros de gases y compuestos de efecto de efecto invernadero toman en cuenta los 7 principales sectores principales (transporte, generación de energía eléctrica, industria, agricultura-ganadería, petróleo-gas, residuos y residencial-comercial). A partir del periodo de 2017 a 2021 se registran las emisiones de CO₂ del sector industria que comprende las 7 las ramas industriales (minerales-cemento, quí-

mica, metales, productos no energéticos-solventes, electrónica, refrigerantes no afectan capa de ozono y manufactura de productos diversos) alcanzó un valor total de 350.12 millones de toneladas métricas. En particular, las emisiones de CO₂ la industria del cemento registró la cantidad de 97 millones de toneladas métricas, esto representó el 27.58% de las emisiones de este sector de México (INEEC, 2024).

La hoja de ruta de la descarbonización en la producción del cemento de México

La hoja de ruta utiliza un enfoque a la producción del cemento al explorar las posibles vías de transición basada en el análisis de tecnologías de menor costo para que la industria cementera reduzca sus emisiones directas de CO₂, de acuerdo con el escenario de los 2 °C. Alcanzar este objetivo requeriría una combinación de soluciones tecnológicas, políticas de apoyo, colaboración pública y privada, mecanismos de financiación y aceptación social. La mejora de la eficiencia energética, el cambio a combustibles alternativos, la combinación con la reducción del contenido de *clínker* en el cemento, la implementación de tecnologías emergentes e innovadoras como la captura de carbono y el uso de materiales aglutinantes alternativos son los principales métodos de mitigación de carbono disponibles en la fabricación de cemento (AIE, 2018).

Los compromisos internacionales de México

Internamente, con base en la premisa de la hoja de ruta, la industria del cemento está transitando hacia retos importantes en el marco del cumplimiento de la Ley General de Cambio Climático y dar cumplimiento a los programas de Auditoría Ambiental promovidos por la Procuraduría Federal de Protección Ambiental (Profepa). En México, la NOM-040-SEMARNAT-2002 regula las emisiones derivadas del proceso de fabricación del cemento, las empresas tienen la obligación de reportar sus emisiones al Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes.

Asimismo, cuenta con el programa voluntario de Industria Limpia, a fin de incentivar la eficiencia de los procesos de producción (Vera, 2013; Pérez y Bejarano, 2008). Es importante considerar que la certificación de la norma ISO 14000 es una herramienta adicional del marco de la regulación y observancia ambiental al implementar el Sistema de Gestión Ambiental por su compromiso ante el Estado y con la Sociedad (Martínez et al., 2021). En este mismo contexto, la industria del cemento en México tiene compromisos internacionales importantes, los cuales se describen a continuación (tabla 8.4).

Tabla 8.4. *Organismos internacionales abocados a la reducción de CO₂*

<i>La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático</i>	El objetivo de la CMNUCC es “impedir interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático mediante la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera”. Las principales respuestas para abordar el cambio climático son la mitigación y la adaptación. La Convención no enumera los GEI que se deben regular, sólo hace referencia al dióxido de carbono y a otros gases de efecto invernadero (CO ₂ eq.).
<i>Contribuciones nacionalmente determinadas</i>	Las NDC son compromisos particulares por sector que los países presentan para reducir sus GEI al año 2030. Ellas son el núcleo del Acuerdo de París y de la consecución de esos objetivos a largo plazo. Las contribuciones determinadas a nivel nacional encarnan los esfuerzos de cada país para reducir las emisiones nacionales y adaptarse a los efectos del cambio climático.
<i>Mecanismos de desarrollo limpio</i>	Ellos se crean a través del artículo doce del Protocolo de Kioto, a objeto que los países desarrollados cumplan con parte de sus compromisos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y que los países en desarrollo se beneficien de las actividades de proyectos que generen certificados de carbono. Pueden participar en él, en forma voluntaria, países desarrollados y países en desarrollo que hayan ratificado dicho protocolo. En el caso de los análisis de los proyectos latinoamericanos MDL para el sector cementero, y de las técnicas que se utilizan en éstos, se indican las principales metodologías existentes para la reducción de emisiones mediante: a) Sustitución de combustibles fósiles por combustibles alternativos (biomasa, llantas, residuos sólidos urbanos, por ejemplo). b) Aumentar el uso de adiciones minerales en la producción de cemento (Reducción de factor <i>clinker</i>). c) Reducción de emisiones de CO₂ en la producción de <i>clinker</i>. d) Mejorar la eficiencia energética (instalación de nuevos hornos).

Acciones nacionales de mitigación apropiadas	Este concepto fue introducido en la Conferencia de las Partes (COP) en Bali en el 2007 como un medio para que los países en desarrollo indiquen las acciones de mitigación que estaban dispuestos a tomar, como parte de su contribución a un esfuerzo global. Las NAMA son un conjunto de propuestas para alcanzar un desarrollo sostenible bajo en emisiones de GEI, de manera medible, reportable y verificable. Estas deben ser factibles, es decir, coherentes con las particularidades del país donde se implementan, y puedan ser apoyadas con financiamiento, tecnología y formación de capacidades por parte de la comunidad internacional.
Low Carbon Technology Partnerships	La iniciativa Low Carbon Technology Partnerships, dirigida por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés), la Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible (SDSN por sus siglas en inglés) y la IEA (Agencia Internacional de Energía) buscan, a través de esta iniciativa, canalizar acciones para el desarrollo de tecnologías bajas en carbono.
Race to Zero (UNFCCC)	Race to Zero impulsada desde las Naciones Unidas y liderada por la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), es una campaña global para reunir el liderazgo y el apoyo de empresas, ciudades, regiones e inversores para una recuperación saludable, resiliente y cero emisiones de carbono que prevenga amenazas futuras, cree empleos dignos y favorezca un crecimiento inclusivo y sostenible.

Fuente: Canacem (2023a).

Las organizaciones mundiales de soporte en la hoja de ruta en la descarbonización de la industria del cemento

Estas organizaciones se pueden considerar como el segundo primer pilar de las estrategias mundiales para enfrentar las causas y efectos del cambio climático, partiendo de la base del Acuerdo de París, sus antecedentes, partes interesadas y sus compromisos de Mitigación y Adaptación (tabla 8.5).

Tabla 8.5. *Organismos internacionales que apoyan la sostenibilidad de la producción del cemento*

<i>GCCA (Global Cement and Concrete Association)</i>	La GCCA es una asociación global dedicada al fortalecimiento y desarrollo de la industria del cemento y el concreto en su contribución a la sostenibilidad. Con este fin, la GCCA promueve la construcción de edificios e infraestructuras duraderas, resistentes y ambientalmente sostenibles a nivel global.
<i>CSI (Iniciativa para la Sostenibilidad del Cemento)</i>	La Cement Sustainability Initiative durante sus casi 20 años de historia se ha centrado en definir los contenidos para una gestión responsable en la producción de cemento a nivel global. Entre sus ejes de trabajo se destacó el cambio climático, el consumo de combustibles, la seguridad de los colaboradores, las emisiones en el aire, el reciclaje de concreto y la gestión de canteras.
<i>GNR (Getting the Numbers Right)</i>	GNR es una base de datos, sobre el desempeño en emisiones de CO ₂ y consumo de energía en la industria global del cemento (849 instalaciones individuales que representan el 19% de la producción mundial de cemento). Todas las compañías participantes y grupos de interés tienen acceso a reportes estandarizados; también es posible realizar y obtener solicitudes adicionales sobre temas específicos, siempre dentro de estrictos lineamientos de confidencialidad.
<i>LCTPI (Low Carbon Technology Partnerships)</i>	La iniciativa Low Carbon Technology Partnerships, dirigida por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés), la Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible (SDSN por sus siglas en inglés) y la IEA (Agencia Internacional de Energía) buscan, a través de esta iniciativa, canalizar acciones para el desarrollo de tecnologías bajas en carbono. LCTPI ha reunido a más de 150 empresas globales con 70 socios para trabajar colaborativamente, esta es una iniciativa del Programa de Soluciones para la COP21. Finalizada la COP21 se llevaron a cabo reuniones en Durban, San Paulo, Nueva Delhi, Nueva York, Pekín y Londres, donde los planes de acción fueron compartidos y conformados con los aportes de las partes interesadas.

Fuente: Canacem (2023a).

Los 3 ejes de la industria mexicana del cemento hacia descarbonización en la producción (kg de CO₂ / tonelada de cemento)

Eje 1: Coprocesamiento de la incineración combustibles alternativos

El coprocesamiento adoptado por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUMA) en el marco del Convenio de Basilea, corresponde a un concepto de desarrollo sostenible basado en los principios de la ecología industrial, que se centra en el papel potencial de la industria para reducir las cargas ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida del producto, al convertir los residuos de una industria en materia prima o recursos ener-

géticos de otra (Grimmeissen et al., 2020). En la actualidad, la incineración de residuos en la industria cementera se da en dos sentidos, primero permite tener un ahorro al usarlos como Combustibles Derivados de Residuos (CDR) en vez de combustibles fósiles y el cobro por la incineración que se les denomina (CDR). El cobro oscila entre los 120 y 150 pesos por tonelada. La industria utiliza este servicio por la nula o inadecuada gestión dado que es común su presencia invadiendo ríos o lagunas ante la escasa cultural ambiental (Carrasco y Toledo, 2015).

En México, este modelo de gestión no aplica del todo a los residuos industriales o peligrosos; este procesamiento es regulado por la NOM-050-SEMARNAT-2018 (Carrasco y Toledo, 2015). Sin embargo, los riesgos potenciales conllevan a la generación de sustancia con riesgos de ser consideradas como cancerígenas (Ruiz, 2007). En la tabla 8.6 se pueden comparar las ventajas y riesgos ante el uso de este tipo de combustible alternativos.

Tabla 8.6. Los combustibles alternativos usados en la línea de producción de cemento

Material	Energía térmica	Emisiones	Observaciones
Revestimiento de carbón gastado (SCL)	Requirió 2. 42 veces la cantidad de carbón.	Produjo 79% más de dióxido de carbono que el carbón puro.	El uso de SCL no proporciona una energía térmica significativa; más bien, reduce el flujo del material de alimentación y es una fuente de flúor. La desventaja de usar SCL es un aumento en las emisiones de dióxido de carbono. El factor limitante para el uso de SCL es el contenido de óxido de sodio o álcali.
Lubricante industrial.	Se requieren 2 kg menos de material que el carbón para generar la energía térmica demandada.	Las emisiones de CO ₂ aumentaron 13% para el caso en que el carbón fue completamente sustituido por lubricantes industriales usados.	La implementación de lubricantes usados como combustible es la alternativa más sencilla, debido a la naturaleza líquida del material; el equipo de almacenamiento y manejo requiere poco espacio y se puede incorporar fácilmente en una planta existente.

<i>Material</i>	<i>Energía térmica</i>	<i>Emisiones</i>	<i>Observaciones</i>
Llantas o neumáticos usados.	Se requieren 1.2 kg menos de material que el carbón para generar la energía térmica demandada.	Los neumáticos usados produjeron un 9% menos de dióxido de carbono que el carbón puro.	La incineración de neumáticos usados es una práctica sostenible, ya que las aplicaciones de reciclaje actualmente no pueden consumir la cantidad de material generado. Además, se encontró que la combustión de neumáticos en el horno era un proceso limpio debido a la temperatura muy alta y a los largos tiempos de residencia.
Plásticos (PET y PVC).	Se requiere un 50.28% más de material, si se compara con el carbón.	Las emisiones son un 20.89% inferiores que el equivalente para el uso de carbón.	—
Fibra de pape.l	Se requiere un 46.92% más de material, si se compara con el carbón.	Las emisiones son un 32.68% inferiores que el equivalente para el uso de carbón.	—
Lodos de plantas de tratamiento de agua residuales (PTAR).	6.2-8.2 MJ/kg.	—	Los hornos que utilicen este material trabajan a temperaturas tan altas, que se logra la eliminación de organismos patógenos y otros orgánicos peligrosos.
Lodos de petróleo.	8.53-20.25 MJ/kg El uso de este material en un 14% w/w en la mezcla cruda logra que 1.6 ton de esta mezcla sea igual 0.12 ton de carbón.	La adición de lodos de aceite aumentó la concentración de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) durante la desgasificación en más del 90%. Sin embargo, la cantidad de COV disminuyó a medida que aumentó la temperatura de calcinación, lo que sugiere que el fango debe procesarse a altas temperaturas (por encima de 1 450 °C).	—

Material	Energía térmica	Emisiones	Observaciones
Combustible a base residuos sólidos municipales, residuos de biomasa, lodos de plantas de tratamiento, residuos industriales peligrosos, entre otros	—	En 2006 varios países europeos con estos combustibles de rechazo cubrieron más del 70% de energía térmica requerida para la fabricación de cemento.	—
Mezcla de cascarilla de arroz con combustible	2530-5250 kcal/ kg	La adición de la mezcla disminuyó la concentración de emisiones de gas NOx, aunque la cantidad de gas SOx no se vio afectada a la temperatura de calcinación probada.	Produce inmensas cantidades de rendimiento de volátiles (cenizas> 96% en peso) y poco carbono fijo. El consumo de electricidad decreció un 13% con la utilización de mezclas de este combustible al 5%.
Residuos de alimentos	668-4919 kcal/ kg	—	Una sustitución del 20% por el coque disminuyó en un 2% la productividad en las plantas. Una mezcla de estos residuos (80%) y papel (20%) mostró un incremento en la productividad cercana al 2% en las plantas.

Fuente: Aristizábal y González (2021, p. 105).

Eje 2: Sustitución del *clínker*

Los materiales alternos al *clínker* pueden ofrecer mayores ventajas como materiales en la reducción de gases contaminantes. Estos tipos de materiales incluyen las escorias de los hornos de la fundición del hierro, cenizas volantes, puzolanas a partir de cenizas volcánicas, cenizas de cáscara de arroz, humo de sílice, entre otros. Asimismo las arcillas calcinadas son también un gran potencial en el desempeño y durabilidad del cemento (Vera, 2013). Estos materiales son conocidos como puzolanas de sílice y/o aluminas que no poseen alto poder cementante de manera individual, pero, si presentan un tamaño de partícula muy pequeña pueden reaccionar químicamente como compuestos cementantes en presencia de agua a temperatura ambiente. Al lograr realizar reemplazos parciales de *clínker* por estos materiales puzolánicos se ahorra energía en la producción del *clínker* y disminuyen las emisiones CO_x, SO_x, NO_x en el horno, esto también evita la

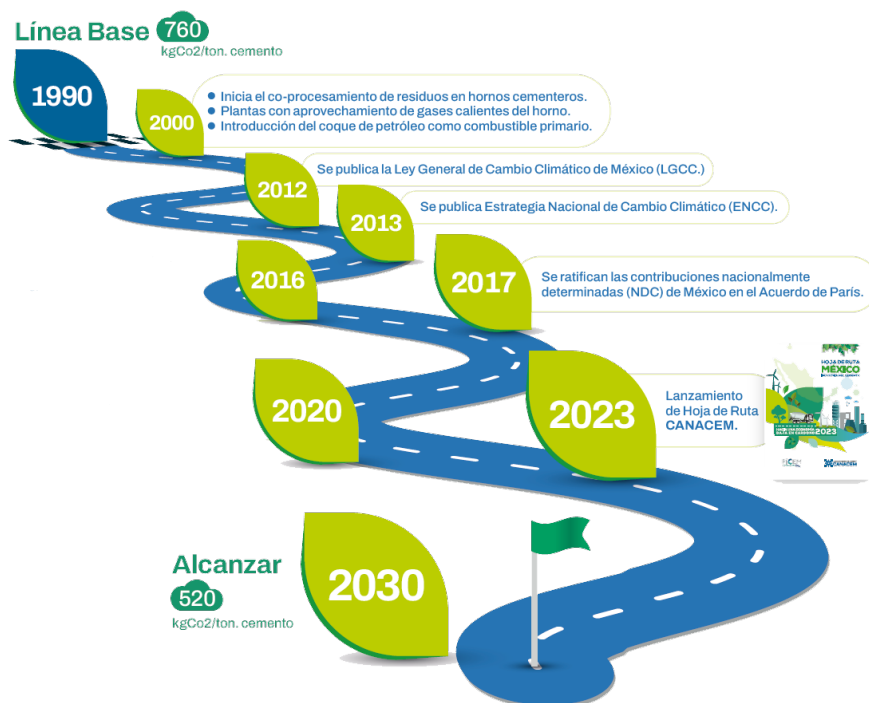
sobreexplotación de yacimientos de canteras (Revuelta, 2022). En esta etapa la meta de ecoeficiencia en el consumo 3.69 GJ/t de *clínker* (giga-Joules por toneladas de *clínker*).

Eje 3: Eficiencia térmica

Por recomendaciones de la Federación Interamericana del Cemento y el Instituto del Cemento y el Hormigón (FICEM e ICH), la mejora en el consumo energético térmico propuesto será de 3.550 GJ/t de *clínker*. Asimismo, la eficiencia energética eléctrica recomendada será de 102 kWh por tonelada de cemento (Grimmseissen et al., 2020). La industria cementera tradicionalmente es un sector con un alto consumo energético; suele representar aproximadamente el 40% de los costos de producción (incluido el costo de electricidad, pero no los costos de inversión). Parte de la hoja de ruta consiste en la mejora y eficiencia energética siendo este eje es uno de los principales involucrados para apoyar la sostenibilidad de este sector de México (Canacem, 2023a).

La tendencia a la baja del consumo energético implica las tres principales etapas del proceso de producción las cuales deberán enfocarse hacia (a) la inversión de equipos especializados en la disminución de consumo de energía y (b) la implementación de equipos especializados en la captura de CO₂ a fin de fomentar la conciencia ambiental, seguridad y salud de trabajadores y comunidades (Flores, 2003).

En México con la propuesta de estos tres ejes se puede aseverar que la integración de tecnologías emergentes e innovadoras, en la línea de producción industrial, como la captura de carbono, la reducción del contenido de *clínker* en el cemento y la eficiencia energética y eléctrica la meta a lograr las mayores reducciones de emisiones a partir de una línea base de 1990 era 760 kg CO₂ / tonelada-cemento podrá lograrse una relación producción de 520 kg CO₂/ tonelada-cemento para el 2030 (figura 8.6).

Figura 8.6. *Propuesta de la descarbonización de la industria del cemento de México*

Fuente: Canacem (2023b, p. 5).

Discusión

La propuesta de la hoja de ruta, para el sector de la industria mexicana del cemento, tiene un enfoque multifactorial que debe abarcar distintos niveles en los que se incluyen los compromisos internacionales en la baja emisión de los GEI y las organizaciones que apoyan a esta industria. El desempeño como industria nacional afronta nuevos retos prioritarios y desafíos con respecto a la investigación y la incorporación de la tecnología innovadora a los procesos de producción del cemento. La hoja de ruta traza un enfoque ascendente para explorar posibles vías de transición basada en el análisis de tecnologías de menor costo. Suele aplicarse para reducir emisiones directas

de CO₂ con efecto invernadero. Esta hoja de ruta ha requerido de una combinación de soluciones tecnológicas, políticas de apoyo, colaboración público-privada, mecanismos de financiación y aceptación social.

Los Acuerdos de París, en la COP21, especifican que es mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1.5 °C, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático.

El subsecuente paso ante la anterior premisa abre el camino al uso de combustibles cero de CO₂. Este es un reto tecnológico complicado y quizá poco factible por el alto costo económico tanto para México como el resto de otros países de este sector. La tabla 8.7 se resumen las cuatro fuentes de energía (Aristizábal y González, 2021; Borowski y Karlikowska, 2023).

Tabla 8.7. Las 4 principales fuentes energéticas con tendencia a la baja emisión de CO₂

Material	Energía térmica	Emisiones	Observaciones
1. Energía fotovoltaica, solar térmica y electroquímica	a) La piedra caliza de cemento se somete a una electrólisis de baja energía para producir cal, O ₂ y carbonato reducido sin emisión de dióxido de carbono.		b) La electrolisis es un proceso endotérmico y cuando la energía requerida es solar, el proceso es libre de dióxido de carbono originado por la combustión de recursos fósiles.
2. Sistema híbrido fotovoltaico y eólico	a) Es una solución tendencia para mitigar las emisiones de CO ₂ mediante el establecimiento de una red renovable que pueda satisfacer una fracción significativa de la demanda exigida por la industria.		b) En este tipo de instalaciones son más eficientes aquellas en las que se cuenta con un banco de baterías para el almacenamiento de la energía en las horas de mayor irradiación solar y de mayor velocidad y disponibilidad de vientos.
3. Calcinador solar	a) La implementación de la energía solar térmica en la planta de cemento tendría lugar a través de un reactor solar en el que el calor se suministra a través de energía solar concentrada.	Si el 50% de las plantas adopta la tecnología de calcinación solar, para 2050, las reducciones de emisiones sumarían el 7% (en el caso optimista) y el 2%, en el caso pesimista.	

Material	Energía térmica	Emisiones	Observaciones
4. Hidrógeno	El uso del hidrogeno es una fuente importante que eliminará las emisiones nocivas que generan las fuentes no renovables a base de combustibles fósiles.		El hidrógeno es la fuente de energía que en los próximos años hará una contribución significativa y decisiva a la transformación energética global y llevará a una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Fuente: Aristizábal y González (2021, p. 106) y Borowski y Karlikowska (2023, p. 4).

La posibilidad de utilizar estas tecnologías, las modificaciones técnicas necesarias y su aplicación en la producción de cemento son una incógnita para este sector industrial.

Referencias

Aguilar, J. (2023). *Contaminación ambiental por la inadecuada gestión de llantas usadas por el parque del municipio de Villavicencio-Meta, Colombia* [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Colombia. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/54711>

Agencia Internacional de Energía (AIE). (2018, 5 de abril). *La hoja de ruta de la tecnología del cemento traza un camino para reducir las emisiones de CO₂ en un 24% para 2050*. <https://www.iea.org/news/cement-technology-roadmap-plots-path-to-cutting-co2-emissions-24-by-2050>

Albert, L. (2008). *Curso básico de toxicología ambiental*. Organización Mundial de la Salud / Limusa.

Ali, M. B., Saidur, A. y Hossain, M. (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2252-2261. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>

Andrew, R. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Sciences Data*, 10(4), 195-217. <https://doi.org/10.5194/essd-2018-90>

Appadurai, A. (s/f). *Proceso de fabricación de cemento: Problemas ambientales*. <https://www.ennomotive.com/cement-manufacturing-emissions>

Aristizábal-Alzate, C. E. y González-Manosalva, J. (2021). Revisión de las medidas en pro de la eficiencia energética y la sostenibilidad de la industria del cemento a nivel mundial. *Revista UIS Ingenierías*, 20(3), 91-110. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021006>

Borowski, P. F. y Karlikowska, B. (2023). Clean hydrogen is a challenge for enterprises in

- the era of low-emission and zero-emission economy. *Energies*, 16(3), 1-15. <https://doi.org/10.3390/en16031171>
- Bosoaga, A., Masek, O y Oakey, J. (2009). CO₂ capture technologies for cement industry. *Energy Procedia*, 1(1), 133-140. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.020>
- Cámara Nacional de Cemento (Canacem). (2023a). *Hoja de ruta México: Industria del cemento: Hacia una economía baja en carbono*. Federación Interamericana del Cemento. <https://canacem.org.mx/site/wp-content/uploads/2023/03/Hoja-de-Ruta-Mexico-FICEM.pdf>
- Cámara Nacional de Cemento (Canacem). (2023b). *Hoja de ruta México: Industria del cemento: Hacia una economía baja en carbono* [folleto hoja de divulgación]. Federación Interamericana del Cemento. <https://canacem.org.mx/site/wp-content/uploads/2023/03/Folleto-Hoja-de-Ruta-CANACEM.pdf>
- Carrasco, B. y Tadeo, J. (2014-2015). Incineración de residuos en cementeras. *Entre Textos*, 6(18), 1-11. <https://revistasacademicas.iberoleon.mx/index.php/entretextos/article/view/448/378>
- Carro Suárez, A. (2022, septiembre). La industria cementera en la descarbonización. *Dinamo Técnica: Revista Gallega de Energía*, (28), 31-32. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8661280>
- Cavalett, O., Watanabe, M. D. B., Feiger, K., Hoenig, V. y Cherubini, F. (2022). LCA and negative emission potential of retrofitted cement plants under oxyfuel conditions at high biogenic fuel shares. *Scientific Report*, 12, 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13064-w>
- Díaz, A. (2012). *La evolución de la industria del cemento con énfasis en Latinoamérica* [Tesis]. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos, Guatemala. https://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3377_C.pdf
- Díez Urquiza, I. (2019, febrero). *Modificación del diseño de explotación del frente 2C, en la Concesión de Explotación "Larrako" No 12.675, en los municipios de Arrigorriaga y Bilbao (Bizkaia): Estudio de impacto ambiental* [Documento de síntesis]. Cementos Rezola y Heidelberg Cement Group. https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/modi_frente_2c_larrako_12675/es_def/adjuntos/Documento_sintesis.pdf
- El-Sayed, A., Fahein, A., Salman, A. y Saleh, H. (2020). Introductory chapter: Cement industry. En H. El-Din, M. Saleh y R. O. A. Rahman (Eds.), *Cement based materials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73784>
- European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) y European Environmental Agency (EEA). (2016). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016: Technical guidance to prepare national emission inventories* (EEA Report, 21/2016). <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2016>
- Fennell, P. S., Davis, S. J. y Mohammed, A. (2021). Descarbonizing cement production. *Joule*, 5, 1301-1311. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.04.011>
- Flores Romero, Á. E. (2003). *La variable ambiental en la trayectoria tecnológica de la industria cementera* [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma Metropolitana, Xochimilco, México. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/795>
- Grimmeissen, L., Jensen, A. y Wehner, S. (2020, julio). *Hoja de ruta para el desarrollo de*

- bajas emisiones en la industria chilena del cemento*. Ministerio de Energía del Gobierno de Chile / Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) / Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania / Fundación Bariloche / Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) / Banco Interamericano de Desarrollo (BID). https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/09/TNA-Cemento_2020-07-20_Informe-FINAL.pdf
- Ige, O. E., Von Kallon, D. V. y Desai, D. (2024). Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26, 579-597. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02683-0>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2024). *Análisis de los sectores productivos con mayor emisión de gases y compuestos de efecto invernadero*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/921220/03_2024_EmissionesPorSectoresEcon_micos_290524.pdf
- Kunak. (2022, 21 de febrero). *Impacto ambiental de la industria cementera: Desafíos y soluciones tecnológicas*. <https://kunakair.com/es/impacto-ambiental-industria-cementera/>
- Marmier, A. (2023). *Decarbonisation options for the cement industry*. Unión Europea. <https://doi.org/10.2760/174037>
- Martínez Rodríguez, M. C., Campos Villegas, L. E. y Castillo Monroy, J. (2021). Metodologías para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero: Descripción del proyecto de control en una industria productora de cemento. *Tecnología en Marcha*, 34(3), 177-189. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5313>
- Mendoza Castro, M. L. y Urbina Garrido, I. I. (2017). Diagnóstico geológico minero ambiental de las canteras de caliza en el departamento del Cesar. *Revista Agunkuyâa*, 2, 25-41. <https://revia.areandina.edu.co/index.php/Cc/article/view/1219/1095>
- Nájera, G. (2002). *Desarrollo integral de una organización: El caso de la industria del cemento* [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México. <http://eprints.uanl.mx/5224/1/1020148241.pdf>
- Pérez Uribe, R. y Bejarano, A. (2008, enero-abril). Sistema de gestión ambiental: Serie ISO 14000. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (62), 89-105. <https://www.redalyc.org/pdf/206/20611457007.pdf>
- Planelles, M. (2025, 4 de marzo). 20 empresas emiten ellas solas más del 40% de todo el CO₂ que expulsa el sector fósil mundial. *El País*. <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2025-03-05/20-empresas-emiten-ellas-solas-mas-del-40-de-todo-el-co-que-expulsa-el-sector-fosil-mundial.html>
- Revuelta Muñoz, M. E. (2022, mayo). *Análisis de ciclo de vida de nuevo material cementante realizando reemplazos parciales con dos tipos de residuos agroindustriales puzolánicos* [Tesis de magister en Ingeniería Civil]. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad del Norte, Colombia. <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/10833/1045704387.pdf>
- Romo Murillo, D., Romero Hernández, O. y Samaniego, R. (2005). *Industria y medio am-*

- biente en México. *Hacia un nuevo paradigma para el control de la contaminación*. Instituto Tecnológico Autónomo de México. Miguel Ángel Porrúa.
- Ruiz Lorenzo, M. L. (2007). *Determinación y evaluación de las emisiones de dioxinas y furanos en la producción de cemento en España* [Tesis de doctorado]. Universidad Complutense de Madrid, España. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/56371>
- Salomón, A. (2006). La industria del cemento en México. *Comercio Exterior*, 56(9), 812-824. http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/93/6/Horiz_CEMENTO.pdf
- Sanjuán Barbudo, M. Á. y Chinchón Yepes, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland*. Universidad de Alicante. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/45347/1/2014_Sanjuan_Chinchon_Cemento-Portland.pdf
- Secretaría de Economía (SE). (2013). *Estudio de la cadena productiva de los materiales pétreos* (documento de análisis). Dirección General de Desarrollo Minero. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5489/cp_materiales_petreos_1013.pdf
- Sistema Español de Inventario de Emisiones (SEIE). (2017). *Fabricación de cemento (proceso de descarbonatación)* [ficha técnica]. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040612-descarbonatac-fabric-cemento_tcm30-429851.pdf
- Storey Contreras, S. E. y Colina Arenas, B. E. (2016). Innovación sustentable en una industria cementera en el Estado Zulia (Venezuela). *Opción*, 32(10), 812-839. <https://www.redalyc.org/pdf/310/31048901045.pdf>
- Vásquez, B. y Corrales, S. (2017). Industria del cemento en México: Análisis de sus determinantes. *Problemas del Desarrollo*, 48(188), 113-138. <https://doi.org/10.1016/j.rpd.2017.01.006>
- Ventura Cortés, C. N. (2019, noviembre). *Cementeras: La falsedad del desarrollo territorial, reducción de bienes ambientales y la violencia de los derechos fundamentales de las mujeres*. Fundación Heinrich Böll Stiftung. https://sv.boell.org/sites/default/files/2020-05/Documentos_cemento_El_Salvador%20-%20EDITADORD11MA-YO%20IJH.pdf
- Vera Martínez, P. S. (2013). *La industria del cemento entre la sustentabilidad y la inestabilidad financiera: Cemex, Holcim y Lafarge* [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000705167/3/0705167.pdf>
- Vera Martínez, P. S. (2017). Cadena de valor de la industria del cemento en México. En P. S. Vera Martínez (Coord.), *Cadenas de valor y sostenibilidad en Latinoamérica* (pp. 175-205). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://librosoa.unam.mx/handle/123456789/2652>

9. Tecnologías no térmicas en alimentos: Innovación para una industria verde y sostenible



ILSE MONROY RODRÍGUEZ*

JOSÉ IRVING VALDEZ MIRANDA**

ANDREA PATRICIA CUEVAS GÓMEZ***

RAÚL EDUARDO LÓPEZ HERNÁNDEZ****

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.09>

Resumen

El uso de tecnologías no térmicas en la industria alimentaria es una estrategia clave para avanzar hacia un sistema sostenible y eficiente. En un contexto donde la demanda de alimentos seguros y nutritivos crece junto con la necesidad de reducir el impacto ambiental, estas tecnologías ofrecen soluciones innovadoras. Su aplicación permite reducir el consumo energético y la generación de residuos, conservando la calidad sensorial y nutricional de los alimentos al evitar la aplicación de altas temperaturas que pueden degradar compuestos bioactivos. En la ciencia y tecnología de alimentos, el ultrasonido, las altas presiones hidrostáticas y campos electrostáticos de alto voltaje han demostrado ser herramientas eficaces para asegurar la calidad microbiológica, prolongar la vida útil y conservar/mejorar propiedades funcionales. Su integración en la industria no sólo responde a exigencias regu-

* Doctora en Ciencias en Alimentos. Profesora-investigadora de tiempo completo en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5042-4966> ; correo electrónico: ilse.monroy.r@gmail.com

** Doctor en Ciencias en Alimentos. Profesor en la Universidad Insurgentes, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6703-0568>

*** Doctora en Ciencias en Alimentos por el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6010-4720>

**** Doctor en Ciencias en Alimentos por el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9738-7026>

latorias y comerciales, sino que también impulsa la competitividad del sector al alinearse con principios de sustentabilidad e innovación. En este capítulo se explorarán las ventajas ambientales, nutricionales y económicas de estas tecnologías, así como su papel en la transición hacia una producción alimentaria más responsable en México.

Palabras clave: *tecnologías no térmicas, industria alimentaria, seguridad alimentaria.*

Introducción a las tecnologías no térmicas

La alimentación consciente y una producción sostenible contribuyen significativamente a un estilo de vida saludable y a la mejora en la calidad de vida de las personas. En este contexto, el desarrollo de productos alimentarios mínimamente procesados que contengan un alto valor nutrimental se ha consolidado como una estrategia clave para el futuro del sector alimentario (Acosta et al., 2024). Problemas como el desperdicio de alimentos, la hambruna y la desnutrición representan desafíos globales que demandan soluciones efectivas. Garantizar el acceso a una alimentación completa, equilibrada, segura, suficiente, variada y adecuada es fundamental para promover el bienestar humano y avanzar hacia sistemas alimentarios más equitativos (Acosta et al., 2024; Bermejo et al., 2023; López-Pedrouso et al., 2019).

Cada año, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) lidera múltiples proyectos y estrategias orientadas a erradicar el hambre y fortalecer la seguridad alimentaria y nutricional; de acuerdo con su informe más reciente, se estima que entre 713 y 757 millones de personas, equivalente al 8.9-9.4% de la población mundial enfrentaron condiciones de hambruna en 2023, lo que representa un incremento de aproximadamente 152 millones de personas, en comparación con 2019 (FAO, 2024).

En México, se estiman más de 20 millones de toneladas de alimentos al año desperdiciados, suficientes para alimentar a 25 millones de personas (Astudillo-Suárez, 2025). Estos alimentos podrían alimentar, durante semanas, a los 7.4 millones de personas que actualmente viven en condiciones

de pobreza extrema y carencia alimentaria. La reducción del desperdicio alimentario, que representa aproximadamente un tercio de los alimentos producidos a nivel global y la disminución de su impacto ambiental sobre el medio ambiente, son condiciones necesarias para avanzar hacia un modelo de economía circular que fomente un uso justo, responsable y sostenible de los recursos (Fanzo et al., 2021; Hassoun et al., 2022). En este marco, la innovación tecnológica en el procesamiento de alimentos, incluyendo el uso de tecnologías emergentes, se vuelve indispensable. Las alternativas alimentarias que logren un equilibrio entre calidad nutricional, salud humana y sostenibilidad ambiental deben alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), promoviendo innovaciones que transformen la cadena de valor del sector alimentario (Bermejo et al., 2023).

Actualmente, las tecnologías térmicas convencionales continúan siendo fundamentales para el procesamiento, almacenamiento y preservación de alimentos. Métodos como la pasteurización y la esterilización, que emplean temperaturas elevadas, han demostrado eficacia en la eliminación de patógenos; no obstante, también presentan desventajas como alteraciones en el color, deterioro del valor nutricional y pérdida de características sensoriales, lo que ha impulsado la búsqueda de tecnologías alternativas, como las no térmicas (Caballero-Figueroa et al., 2022).

Entre las tecnologías no térmicas aplicadas al procesamiento de alimentos se destacan el ultrasonido, las altas presiones hidrostáticas (*high pressure processing*, [HPP]) y los campos electrostáticos de alto voltaje (CEAV). Estas tecnologías han demostrado ser efectivas en el procesamiento de una amplia variedad de alimentos, como carnes, huevos, pescados, mariscos, productos lácteos, frutas y hortalizas (López-Pedrouso et al., 2019; Safwa et al., 2024).

Principales tecnologías no térmicas aplicadas en alimentos

Ultrasonido

La tecnología de ultrasonido se basa en el uso de ondas sonoras de alta frecuencia, típicamente superiores a los 20 kHz, que se transmiten a través

de medios líquidos o sólidos (Kumar et al., 2021). Estas ondas generan ciclos alternos de compresión y rarefacción, que inducen la formación de microburbujas o cavidades en el líquido. Este fenómeno, conocido como cavitación acústica, culmina con el colapso de burbujas, generando microjets, un aumento de temperatura y presión localizada, lo cual origina efectos físicos, químicos y biológicos significativos en los alimentos (Li et al., 2023). Entre los principales efectos inducidos por el ultrasonido se encuentran la mejora de la transferencia de calor y masa (Perera y Alzahrani, 2021).

El éxito de la aplicación del ultrasonido en la industria alimentaria depende de la adecuada selección y control de parámetros operativos. Los más relevantes incluyen la frecuencia (kHz), potencia (W/cm^2), intensidad, duración del tratamiento, temperatura y tipo de medio (líquido, sólido o mezcla). Cada uno de estos factores influye directamente en la eficiencia del proceso, la calidad del producto final y los efectos deseados (Mgoma et al., 2025).

Estudios recientes han demostrado que la combinación de ultrasonidos con otros procesos tecnológicos puede incrementar la eficiencia energética y reducir el tiempo de procesamiento, contribuyendo a prácticas más sostenibles (Li et al., 2023; Soquetta et al., 2018).

Aplicaciones y ventajas del ultrasonido en la industria de alimentos

Las aplicaciones del ultrasonido en la industria de alimentos son amplias, algunas de ellas se resumen en la figura 9.1. Entre sus principales aplicaciones, destaca la extracción de compuestos funcionales, en la que el ultrasonido facilita la ruptura de las paredes celulares de matrices vegetales, favoreciendo la liberación de flavonoides, compuestos fenólicos, carotenoides y otros compuestos antioxidantes (Chemat et al., 2017). Esta técnica es especialmente útil para obtener extractos con alta actividad biológica a partir de residuos agroindustriales, contribuyendo así a la valorización de subproductos y al aprovechamiento integral de materias primas (Pattnaik et al., 2021).

Figura 9.1. Aplicaciones de la tecnología de ultrasonido en la industria de alimentos



Fuente: Mgoma et al. (2025).

En cuanto a la conservación de alimentos, el ultrasonido se emplea para la inactivación microbiana y enzimática, sobre todo en combinación con tratamientos a baja temperatura. Esta estrategia permite extender la vida útil de los productos sin comprometer sus características sensoriales ni su valor nutricional (Pattnaik et al., 2021).

Aunado a lo anterior, destaca el ahorro de tiempo en procesos como el secado y la fermentación. En el caso del secado, el ultrasonido se utiliza como pretratamiento, lo que permite reducir significativamente el tiempo de operación y mejorar la retención de nutrientes, color y textura. En fermentaciones, su aplicación en etapas iniciales puede estimular la actividad de microorganismos beneficiosos, acortando los tiempos necesarios para alcanzar el perfil deseado en productos como yogur, kéfir o kombucha (Qian et al., 2023).

El ultrasonido también se emplea en la elaboración de mezclas, facilitando la formación de emulsiones estables, lo cual es especialmente valioso en productos como aderezos, bebidas funcionales y alimentos lácteos. Además, permite mejorar la textura de productos tipo espuma, geles y emulsiones mediante la modificación de las interacciones moleculares (Qayum et al., 2023).

Desde una perspectiva sostenible, esta tecnología posibilita la recuperación de nutrientes en residuos, como fibras dietéticas o proteínas hidrolizadas, contribuyendo al desarrollo de ingredientes funcionales con valor agregado. Asimismo, se ha reportado su efectividad en la eliminación de contaminantes como pesticidas y compuestos químicos residuales en frutas, vegetales y cereales, mejorando la seguridad de los alimentos. Finalmente, el ultrasonido tiene aplicaciones en el análisis y control de calidad, al facilitar evaluaciones no destructivas de propiedades físicas y estructurales (Bhatia et al., 2024).

El ultrasonido representa una tecnología no térmica con amplio potencial en la industria alimentaria. Sus múltiples aplicaciones permiten mejorar la eficiencia de los procesos, preservar la calidad de los productos, y valorizar residuos agroindustriales, todo ello bajo un enfoque sostenible y alineado con las demandas de una industria alimentaria más verde e innovadora (Bhatia et al., 2024).

Altas presiones

El procesamiento por altas presiones (*high pressure processing*, [HPP]) es una tecnología no térmica aplicada en la industria alimentaria para mejorar la seguridad microbiológica, conservar compuestos bioactivos y extender la vida útil de los productos sin comprometer sus propiedades nutricionales y sensoriales (Patel et al., 2015). Esta técnica utiliza presiones hidrostáticas uniformes entre 300 y 600 MPa sobre alimentos previamente envasados, transmitidas de forma isostática en todas las direcciones, lo cual preserva la integridad estructural del alimento (Betoret et al., 2015). A diferencia de los métodos térmicos tradicionales, el procesamiento HPP minimiza la degradación de nutrientes sensibles al calor, reduciendo la necesidad de conservadores químicos y promoviendo prácticas sostenibles acordes con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, como el ODS 3 (salud y bienestar) y el ODS 12 (producción y consumo responsables) (Amjad et al., 2025).

Los efectos de la presión incluyen la desnaturalización de proteínas, la ruptura de membranas celulares, la gelificación de matrices y la estabilización de emulsiones, generando productos seguros y con mejores texturas

(Betoret et al., 2015). Existen diferentes variantes de esta tecnología según la aplicación deseada: HPP (sistema convencional con agua como medio transmisor), UHPH (*ultrahigh pressure homogenization*), que combina presión extrema con homogeneización para mejorar la estabilidad de emulsiones, y HPJ (*high pressure jet*), un tratamiento superficial eficaz para la descontaminación de frutas, vegetales o superficies de contacto (Amjad et al., 2025; Betoret et al., 2015). La elección del tipo de tratamiento dependerá del objetivo específico y de la naturaleza de la matriz alimentaria.

Aplicaciones y ventajas ambientales de la tecnología por altas presiones en la industria de alimentos

Las aplicaciones de la tecnología por altas presiones son versátiles y abarcan diversos sectores de la industria alimentaria. En productos lácteos, como leche, yogures y quesos frescos, se ha demostrado su efectividad para prolongar la vida útil y mantener una calidad sensorial aceptable. La HPP es capaz de eliminar la carga microbiana sin afectar significativamente la actividad enzimática o la concentración de compuestos bioactivos, lo cual representa una ventaja competitiva frente a la pasteurización térmica (Komora et al., 2020).

En el sector cárnico, esta tecnología permite la reducción de bacterias patógenas como *Listeria monocytogenes* y *Salmonella* spp., manteniendo la textura y el color de carnes frescas, cocidas o curadas (Komora et al., 2020). Asimismo, en vegetales y frutas mínimamente procesadas, la HPP conserva características de frescura, color y firmeza, elementos importantes para la aceptación del consumidor. Además, se ha reportado el uso de esta tecnología para la extracción de compuestos de interés a partir de subproductos, lo cual fortalece su papel en procesos de valorización y sostenibilidad (Amjad et al., 2025).

La implementación del procesamiento por altas presiones en la industria alimentaria representa un avance importante hacia modelos de producción más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente (Batty et al., 2019). Esta tecnología permite reducir significativamente la dependencia de métodos convencionales que implican un alto consumo energético o el uso intensivo

de aditivos químicos. En la figura 9.2, se ilustran de manera esquemática las principales ventajas ambientales y sostenibles asociadas a la HPP.

Figura 9.2. Ventajas ambientales de la tecnología por altas presiones en la industria alimentaria



Fuente: Safwa et al. (2024).

En primer lugar, la HPP permite el menor uso de aditivos alimentarios, particularmente conservadores, gracias a su eficacia para inactivar microorganismos patógenos y deteriorativos. Esto favorece el desarrollo de productos más naturales y seguros (Inácio et al., 2014). A la vez, al disminuir el desperdicio alimentario mediante el alargamiento de la vida útil, se contribuye a reducir pérdidas económicas y ambientales relacionadas con el deterioro de alimentos (Amjad et al., 2025). Otra ventaja relevante es el ahorro energético, ya que el tratamiento puede realizarse a temperatura ambiente o en frío, con un consumo relativamente bajo en comparación con procesos térmicos prolongados. Además, la HPP favorece la conservación de nutrientes y propiedades sensoriales, lo cual incrementa el valor nutricional y la aceptación del producto final por parte del consumidor (Betoret et al., 2015). Finalmente, su compatibilidad con otras tecnologías verdes, como microon-

das o pulsos eléctricos, amplía las posibilidades de diseño de procesos sinérgicos, más eficientes y sostenibles (Munir et al., 2020).

En conjunto, estas características consolidan al HPP como una herramienta clave para fortalecer la economía circular en el sector alimentario, al mismo tiempo que promueve prácticas responsables alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. El uso creciente de esta tecnología evidencia su impacto positivo en la salud pública, la economía circular y la eficiencia del procesamiento alimentario, consolidándose como una herramienta clave para una industria más verde y sostenible (Roman et al., 2017).

Campo electrostático de alto voltaje

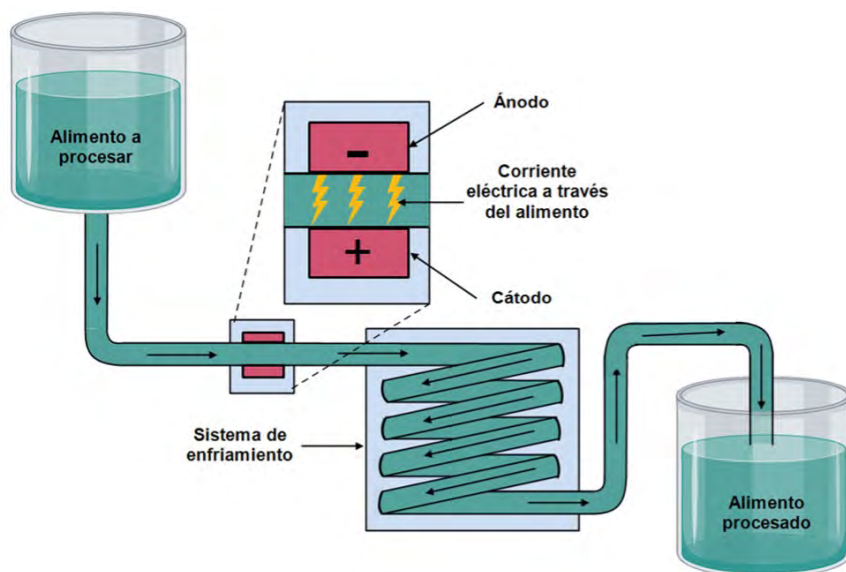
La tecnología de Campo Electrostático de Alto Voltaje (CEAV) se ha convertido en un novedoso método no térmico con un gran potencial para la conservación, descongelación y congelación de alimentos. Esta técnica evita las desventajas de los métodos tradicionales, como la resistencia a los antibióticos, los residuos tóxicos, los daños a estructuras y compuestos bioactivos por efecto térmico, lo que la hace especialmente adecuada para alimentos termosensibles (Qi et al., 2022; Yan et al., 2020). El CEAV funciona modificando la actividad de las enzimas (Valdez-Miranda, Robles-López et al., 2024) e induciendo cambios estructurales en las células microbianas (Huang et al., 2022; Qi et al., 2022), preservando así la calidad y garantizando la inocuidad.

Un campo eléctrico se presenta cuando dos objetos con diferentes cargas eléctricas se encuentran cerca una de la otra. Además, en la naturaleza, los campos eléctricos pueden formarse alrededor de cualquier objeto que tenga una carga eléctrica en relación con su entorno (Wang et al., 2009). Empíricamente se puede observar que objetos con diferentes cargas eléctricas se atraen a través de un espacio cercano, y cuando se tienen cargas iguales éstas se repelen, y estas fuerzas se propagan a través del espacio (campo) (Reitz et al., 1993). Michael Faraday (1850) describió estas fuerzas como líneas en el espacio (figura 9.3a).

Los campos eléctricos se han utilizado de diversas formas, principalmente como Campo Eléctrico Pulsado (CEP), el cual ha demostrado que

puede prolongar la vida útil de diversos alimentos líquidos mediante la inhibición de microorganismos patógenos y la reducción del deterioro de los alimentos y en alimentos sólidos, al lograr alteraciones que pueden conducir a modificaciones estructurales deseadas o mejorar el proceso de extracción de compuestos bioactivos (Arshad et al., 2021). En esta tecnología se hace pasar una corriente eléctrica a través del alimento en forma de pulsos, debido a esto el CEP favorece a los alimentos con alta conductividad eléctrica ya que la corriente eléctrica fluye de mejor manera a través de éstos. Sin embargo, esta tecnología tiene como desventaja que la temperatura del alimento incrementa debido al efecto Joule y pulsos de alta duración resulta en un mayor incremento significativo de la temperatura, debido a esto, durante la aplicación de los CEP se debe implementar un sistema de enfriamiento (Cavalcanti et al., 2023) como se muestra en la figura 9.3b.

Figura 9.3. Representación esquemática de las tecnologías que hacen uso del campo eléctrico.
a) Campo eléctrico de alto voltaje (las líneas entre los electrodos representan las fuerzas del campo eléctrico). b) Campo eléctrico pulsado



Fuente: Gabrić et al. (2018).

Por otro lado, el CEAV es un proceso de bajo costo y bajo consumo de energía. Una de las ventajas más importantes de esta tecnología es que durante su aplicación no hay incrementos significativos de temperatura (Dalvi-Isfahan et al., 2023), debido a que no hay corriente eléctrica a través del alimento. Por lo tanto, no necesita un sistema de enfriamiento (figura 9.3). La eficacia antibacteriana del CEAV se atribuye a su capacidad de dañar directamente las membranas celulares microbianas, provocando cambios en la permeabilidad, ruptura y desintegración, lo cual finalmente conduce a un crecimiento lento o a la muerte de las células bacterianas (Huang et al., 2022). Por ejemplo, se ha demostrado que el tratamiento con CEAV inhibe a *Staphylococcus aureus* (Qi et al., 2022) y *Acinetobacter johnsonii* mediante la disrupción de membranas (Huang et al., 2022). Además, el CEAV modifica la actividad de las enzimas que degradan los alimentos al inducir la reorganización de sus estructuras secundarias y terciarias, lo que provoca la deformación e inactivación de las mismas (Yan et al., 2020). Estos mecanismos contribuyen a una mayor vida útil y una mejor seguridad microbiana, sin comprometer las cualidades nutricionales y sensoriales de los alimentos.

Aplicaciones y ventajas del campo electrostático de alto voltaje en la industria de alimentos

La tecnología de CEAV se ha aplicado con éxito para conservar frutas y verduras, incluyendo tomates cherry (Zhao et al., 2023), espinacas (Li et al., 2023), ciruelas (Lu et al., 2024), plátanos (Valdez-Miranda, Robles-López et al., 2024), champiñones (Yan et al., 2020), brócoli, zanahorias, granadas, fresas, jujube (Valdez-Miranda, Guitiérrez-López et al., 2024), entre otras. Estudios recientes demuestran que el tratamiento con CEAV retrasa la pérdida de nutrientes, aumenta la dureza, mejora la capacidad antioxidante, reduce la pérdida de peso y los cambios de color, disminuye la carga microbiana y mantiene una mejor microestructura durante el almacenamiento (Zhao et al., 2023). Además, el CEAV induce estrés abiótico en los alimentos, promoviendo la acumulación de compuestos benéficos para la salud como carotenoides y compuestos fenólicos, manteniendo al mismo tiempo la frescura y la seguridad (Valdez-Miranda, Guitiérrez-López et al., 2024).

En comparación con las técnicas de conservación convencionales, la tecnología de CEAV ofrece diversas ventajas notables. Minimiza el consumo de energía, lo que la convierte en una alternativa energéticamente eficiente (Zhao et al., 2023). Al ser un proceso no térmico, el CEAV previene la degradación térmica, lo que lo hace especialmente adecuado para productos sensibles a la temperatura (Yan et al., 2020). Además, el CEAV demuestra una retención de calidad superior al preservar mejor la microestructura, los atributos sensoriales y los componentes nutricionales en comparación con los métodos tradicionales (Yan et al., 2020; Zhao et al., 2023). Estas ventajas posicionan al CEAV como una solución altamente efectiva y versátil para los desafíos modernos de la conservación de alimentos.

Más allá de la conservación, el CEAV también se ha explorado para aplicaciones de descongelación y congelación. Al influir en la organización y actividad molecular, el CEAV altera las características de conducción, difusión y flujo del calor, facilitando la fusión eficiente de los cristales de hielo (Xie et al., 2025). Esta tecnología también se ha utilizado para congelar camarones (Liu et al., 2023), descongelar lichis (Xie et al., 2025) y filetes de cerdo (Hu et al., 2021), y conservación de carne fresca durante el periodo de post mortem temprano (Xu et al., 2024). La tabla 9.1 presenta una comparación detallada entre algunas tecnologías no térmicas (US, HPP y CEAV) utilizadas en el procesamiento de alimentos.

Tabla 9.1. Comparación de tecnologías no térmicas en la industria alimentaria

<i>Tecnología</i>	<i>Principio de funcionamiento</i>	<i>Parámetros de control</i>	<i>Aplicaciones principales en alimentos</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Referencias</i>
Ultrasonido (US)	Ondas acústicas que generan cavitación en medios líquidos o sólidos.	Frecuencia (20-100 kHz), potencia (W/cm²), tiempo de exposición, temperatura.	Extracción de compuestos funcionales, conservación, secado, fermentación, emulsificación y limpieza de equipamiento.	Procesamiento más rápido, preservación sensorial y nutricional, recuperación de compuestos, menor consumo energético.	Kumar et al. (2021), Li et al. (2023), Chemat et al. (2017), Qian et al. (2023), Bhatia et al. (2024).

<i>Tecnología</i>	<i>Principio de funcionamiento</i>	<i>Parámetros de control</i>	<i>Aplicaciones principales en alimentos</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Referencias</i>
Procesamiento a altas presiones (HPP).	Aplicación uniforme de presión isostática, sobre alimentos envasados.	Presión (300-600 MPa), tiempo de retención, temperatura, tipo de producto.	Conservación de lácteos, carnes, frutas, vegetales; Inactivación microbiana y enzimática.	Conserva textura y nutrientes, extiende vida útil, compatible con envases, menor uso de aditivos.	Patel et al. (2015), Knorr et al. (2020), Amjad et al. (2025), López-Quiroga et al. (2023).
Campo electrostático de alto voltaje (CEAV).	Aplicación de campos eléctricos de alto voltaje sobre alimentos.	Intensidad de campo (1-6 kV·cm ⁻¹ aprox. dependiendo del alimento), tiempo (min) y frecuencia (Hz).	Conservación, congelación/ descongelación, estrés abiótico, desinfección en frutas, verduras y productos cárnicos y del mar.	Inhibición microbiana y enzimática, preserva textura, conservación de compuestos termolábiles, eficiencia energética y prolonga la frescura sin aditivos químicos.	He et al. (2016), Huang et al. (2022), Liu et al. (2023), Lotfi et al. (2022), C. Xu et al. (2022), Y. Xu et al. (2024), Yan et al. (2020).

Fuente: elaboración propia.

Ventajas en el impacto ambiental y propiedades nutricionales de alimentos producidos por tecnologías verdes

La sostenibilidad se ha convertido en una prioridad estratégica para la industria alimentaria, no sólo por la presión ejercida por las políticas climáticas globales, sino también por la creciente demanda de consumidores conscientes del impacto ambiental de los productos que consumen (Rabbi y Amin, 2024). La producción y el procesamiento de alimentos deben evolucionar hacia tecnologías más eficientes, sostenibles y responsables con el medio ambiente, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente aquellos relacionados con acciones contra el cambio climático y la producción y consumo responsables (United Nations General Assembly, 2015).

En este contexto, la industria alimentaria ha comenzado a implementar estrategias dirigidas a la reducción del consumo energético, el aprovecha-

miento de subproductos, el desarrollo de empaques biodegradables y la adopción de procesos tecnológicos más limpios a lo largo de la cadena de producción. Estas acciones son fundamentales para disminuir el impacto ambiental sin comprometer la calidad e inocuidad de los alimentos (Karwacka et al., 2022; Punthi et al., 2022).

Uno de los principales retos actuales de la industria alimentaria es disminuir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), especialmente el dióxido de carbono (CO_2), debido a su estrecha relación con el calentamiento global (Shabir et al., 2023). En 2018, se estimó que el sistema alimentario fue responsable de aproximadamente un tercio de las emisiones globales de GEI, siendo el procesamiento industrial de alimentos el responsable de cerca de 0.5 gigatoneladas de CO_2 -eq (Tubiello et al., 2021). Estas emisiones provienen principalmente del uso de combustibles fósiles en procesos térmicos tradicionales como la pasteurización, esterilización y secado, así como de la demanda eléctrica de las operaciones industriales (Shabir et al., 2023).

La huella de carbono (HC) de un alimento puede estimarse a partir de la cantidad y tipo de energía utilizada durante su procesamiento. No sólo es relevante la cantidad de energía empleada, sino también identificar su origen, es decir, si proviene de fuentes renovables o de combustibles fósiles, ya que esto tendrá incidencia en su impacto ambiental; dos tecnologías con igual demanda energética pueden generar huellas de carbono muy distintas dependiendo de la fuente de energía (Allegretti et al., 2022). Otros factores que afectan el consumo energético incluyen el número de etapas de procesamiento, la preparación de las materias primas y la duración de la operación. Mientras más prolongado sea un proceso se requiere más energía (Karwacka et al., 2022).

Chemat et al. (2017) señalaron que el consumo energético de la ultrasonificación, que varía entre 0.1 y 0.3 kWh/kg, es significativamente menor al de la pasteurización convencional, que se sitúa entre 0.5 y 1.2 kWh/kg. Esta diferencia se asocia a los breves tiempos de procesamiento y a la ausencia de etapas de calentamiento. Como resultado, la ultrasonificación genera menos emisiones de carbono, con valores estimados entre 0.05 y 0.1 kg CO_2 -eq/kg, frente a los 0.2 a 0.4 kg CO_2 -eq/kg del tratamiento térmico (Younis et al., 2025).

Diversos estudios han evaluado cuantitativamente la huella ambiental de tecnologías convencionales frente a alternativas emergentes de carácter no térmico. Arnal et al. (2018) investigaron el impacto del uso de CEP como tecnología auxiliar en el proceso de pelado de tomates. Al implementar CEP en lugar del proceso convencional con vapor, se logró reducir el consumo energético y las emisiones de CO₂-equivalente en un 18%. Asimismo, Cacace et al. (2020) compararon el procesamiento de jugo de naranja mediante tecnologías térmicas, como la pasteurización indirecta antes del envasado y la pasteurización por retorta y tecnologías no térmicas como el HPP; los resultados mostraron que las emisiones de CO₂ asociadas a los métodos térmicos fueron: 0.303 kg CO₂-eq/L y 0.532 kg CO₂-eq/L, respectivamente. En cambio, el HPP generó 0.252 kg CO₂-eq/L, evidenciando un menor impacto ambiental. Si bien en los últimos años se han incrementado los estudios para establecer las ventajas de las tecnologías no térmicas sobre las tecnologías convencionales que involucran altas temperaturas, las investigaciones enfocadas en estimar la cantidad de contaminantes emitidos por los distintos procesos de la industria alimentaria aún son limitadas.

Otra estrategia complementaria para reducir el impacto ambiental de la industria alimentaria implica minimizar el desperdicio de alimentos mediante el aumento de la vida útil de los productos. Se estima que el tratamiento de residuos alimentarios genera aproximadamente 0.208 kg CO₂-eq/kg de residuo tratado (Punthi et al., 2022). Las tecnologías anteriormente mencionadas logran minimizar pérdidas en etapas postcosecha e incrementar la vida de anaquel, lo cual incide en el impacto ambiental de la industria alimentaria. Manzoor et al. (2021), estudiaron la reducción de microorganismos en leche de almendra sometida a tratamiento de ultrasonido (40 kHz, 600 W y 60 °C) durante 40 minutos, la investigación descubrió una reducción de 5 y 4 unidades logarítmicas en bacterias aerobias y en levaduras y mohos, respectivamente. De manera similar, Atalar et al. (2019) encontraron una disminución de 5 unidades logarítmicas de bacterias aerobias en leche de avellana sometida a sonicación (62.37 W/cm² y 75 °C) por 15 minutos. La aplicación de estas tecnologías ha demostrado ser eficaces en diversos productos alimentarios como frutos, lácteos, cárnicos, etc. (Alarcon-Rojo et al., 2019; Calderón-Martínez et al., 2021; Manzoor, Xu et al., 2021; Wang et al., 2020).

Aunado a lo anterior, las tecnologías no térmicas han demostrado ser efectivas al no degradar pigmentos, aromas, vitaminas y antioxidantes presentes en productos como jugos, bebidas (lácteas y vegetales) y productos lácteos, en comparación con tratamientos térmicos convencionales (Alirezalu et al., 2020; Baranda y Montes, 2020; Cheng et al., 2020; Pandiselvam et al., 2023; Pérez-Lamela et al., 2021; Shen et al., 2021).

Al considerar tanto sus ventajas tecnológicas como ambientales, estas tecnologías emergentes se perfilan como herramientas clave en la transición hacia sistemas alimentarios más sostenibles, eficientes y responsables con el medio ambiente. Su implementación permite reducir significativamente el consumo energético y las emisiones de CO₂, sin comprometer la calidad nutricional, sensorial o microbiológica de los alimentos. Sin embargo, pesar de sus ventajas, la adopción de estas tecnologías enfrenta desafíos como la inversión inicial en equipos, la necesidad de adaptar líneas de procesamiento y la falta de marcos normativos estandarizados para su uso a gran escala.

Perspectivas de las tecnologías no térmicas y su impacto en la sostenibilidad alimentaria en México

Desde el año 2014, en México se ha reconocido la necesidad de fortalecer la seguridad alimentaria a través del empoderamiento de los consumidores mediante estrategias de educación en salud y nutrición (FAO, 2024). En este marco, la innovación alimentaria ha incorporado no sólo el análisis del contenido calórico de los productos, sino también el desarrollo de herramientas como el etiquetado frontal, el cual permite una mejor información sobre la naturaleza de los alimentos y sus impactos en la salud pública (D'Amico et al., 2016).

Además del etiquetado nutricional, ha surgido el concepto de etiquetado verde, que informa al consumidor sobre el impacto ambiental de los productos y promueve decisiones de compra más sostenibles. Esta herramienta responde a una creciente demanda social por una mayor transparencia sobre los métodos de producción, apoyando así comportamientos de consumo responsables (D'Amico et al., 2016; Potter et al., 2021).

En este contexto, las tecnologías de procesamiento no térmico representan una alternativa viable y estratégica para producir alimentos sostenibles. Estas tecnologías permiten conservar los productos mediante la inactivación de microorganismos y enzimas, sin el uso de altas temperaturas, lo que reduce el deterioro nutricional y sensorial, así como el impacto ambiental del procesamiento (Melios et al., 2025). Su aplicación también abre la posibilidad de formular productos en los que ciertos ingredientes puedan ser sustituidos por alternativas más sostenibles, sin comprometer la inocuidad ni la calidad.

La adopción de tecnologías verdes ha ido en aumento. De acuerdo con Sanz-Cañada (2022), el consumo nacional de alimentos sostenibles en México creció un 132% en los últimos años. Este fenómeno refleja una creciente conciencia social sobre la relación entre salud, alimentación y medio ambiente. En consecuencia, se ha intensificado la búsqueda de métodos de producción que no comprometan la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades.

México es uno de los principales exportadores de productos agroalimentarios, destacando bienes de alto valor comercial como el aguacate, mango, papaya, cerveza, chile y tequila, entre otros, con fuerte presencia en estados como Guerrero y Oaxaca (FAO, 2024). En este contexto, la incorporación de prácticas sostenibles a lo largo de la cadena de producción representa una oportunidad para transitar hacia una industria alimentaria más verde. La promoción de estrategias que reduzcan el uso de recursos y protejan los ecosistemas resulta indispensable para lograr este objetivo (Astudillo-Suárez, 2025).

Por otro lado, en la legislación mexicana, particularmente, la NOM-051-SCFI/SSA1-2010, establece criterios para el etiquetado de alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasadas, permitiendo a los consumidores tomar decisiones informadas con base en aspectos nutricionales. Si bien esta norma ha sido fundamental, su complementariedad con políticas que impulsen la sostenibilidad, como el etiquetado ambiental o “verde”, es una oportunidad para fortalecer el compromiso con la salud y el medio ambiente.

La dinámica actual del mercado abre espacios para aplicar innovaciones biotecnológicas orientadas a la sostenibilidad. Estas innovaciones no sólo buscan mejorar la calidad de los alimentos, sino también aumentar la com-

petitividad de las empresas del sector agroalimentario (Gallego-Bono y Tapia-Miranda, 2021).

Conclusión

La industria alimentaria se encuentra en un punto de inflexión: continuar y perpetuar los sistemas de procesamiento basados en tecnologías térmicas que, si bien han demostrado ser eficientes, presentan desventajas como la degradación de compuestos de interés en los alimentos y un alto impacto ambiental, debido a su elevada demanda energética, o bien, invertir y avanzar hacia tecnologías más sostenibles, eficaces y amigables con el medio ambiente.

En conclusión, las tecnologías no térmicas no sólo representan una herramienta clave para mejorar la sostenibilidad ambiental del procesamiento de alimentos, sino también una vía para innovar en la oferta de productos seguros, nutritivos y alineados con las exigencias del consumidor y del planeta.

Referencias

- Acosta-Calderón, J., Sáyago Ayerdi S. (2024). Alimentación sostenible para la nutrición, salud, bienestar. *Conciencia Tecnológica*, 67, 6-12.
- Alarcon-Rojo, A. D., Carrillo-López, L. M., Reyes-Villagrana, R., Huerta-Jiménez, M. y García-Galicia, I. A. (2019). Ultrasound and meat quality: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 55, 369-382. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.016>
- Alirezalu, K., Munekata, P. E. S., Parniakov, O., Barba, F. J., Witt, J., Toepfl, S., ... Lorenzo, J. M. (2020). Pulsed electric field and mild heating for milk processing: A review on recent advances. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(1), 16-24. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9942>
- Allegretti, G., Montoya, M. A., Bertussi, L. A. S. y Talamini, E. (2022). When being renewable may not be enough: Typologies of trends in energy and carbon footprint towards sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112860. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112860>
- Amjad, N., Imran, A., Naseer, M. S., Tariq, F., Afzaal, M., Fatima, K., Kalandarov, A. e Islam, F. (2025). High pressure processing as a green technology approach for the synthe-

- sis of clean labels in dairy sector: A comprehensive review. *Tikrit Journal for Agricultural Sciences*, 25(1), 132-152. <https://doi.org/10.25130/tjas.25.1.11>
- Arnal, Á. J., Royo, P., Pataro, G., Ferrari, G., Ferreira, V. J., López-Sabirón, A. M. y Ferreira, G. A. (2018). Implementation of PEF treatment at real-scale tomatoes processing considering LCA methodology as an innovation strategy in the agri-food sector. *Sustainability*, 10(4), 979. <https://doi.org/10.3390/su10040979>
- Astudillo-Suárez R. (2025). *Iniciativa con proyecto de decreto por el que se expide la ley nacional contra el desperdicio de alimentos*. Diario Oficial de la Federación.
- Atalar, I., Gul, O., Saricaoglu, F. T., Besir, A., Gul, L. B. y Yazici, F. (2019). Influence of thermosonication (TS) process on the quality parameters of high pressure homogenized hazelnut milk from hazelnut oil by-products. *Journal of Food Science and Technology*, 56(3), 1405-1415. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03619-7>
- Baranda, A. B. y Montes, P. (2020). HPP for improving preservation of vitamin and antioxidant contents in vegetable matrices. En *Present and future of high pressure processing* (pp. 15-70). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816405-1.00002-9>
- Batty, D., Meunier-Goddik, L. y Waite-Cusic, J. G. (2019). Camembert-type cheese quality and safety implications in relation to the timing of high-pressure processing during aging. *Journal of Dairy Science*, 102(10), 8721-8733.
- Bermejo, L., Trabado-Fernández, A., Aparicio, A., Lozano-Estevan, M. y López-Plaza, B. (2023). Sostenibilidad alimentaria: Claves para el consumidor, ventajas e inconvenientes. *Nutrición Hospitalaria*, 40(2), 70-76. <https://doi.org/10.20960/nh.04960>
- Betoret, E., Betoret, N., Rocculi, P. y Dalla Rosa, M. (2015). Strategies to improve food functionality: Structure-property relationships on high pressures homogenization, vacuum impregnation and drying technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 46(1), 1-12.
- Bhatia, L., Kaladhar, D. S. V. G. K., Sarkar, T., Jha, H. y Kumar, B. (2024). Food wastes phenolic compounds (PCs): Overview of contemporary greener extraction technologies, industrial potential, and its integration into circular bioeconomy. *Energy, Ecology and Environment*, 9(5), 455-485. <https://doi.org/10.1007/s40974-024-00321-z>
- Caballero-Figueroa, E., Terrés, E., Hernández-Hernández, H. M. y Escamilla-García, M. (2022). Revisión sobre las tecnologías emergentes no térmicas para el procesamiento de alimentos. *TIP: Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.459>
- Cacace, F., Bottani, E., Rizzi, A. y Vignali, G. (2020, marzo). Evaluation of the economic and environmental sustainability of high pressure processing of foods. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 60, 102281. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102281>
- Calderón-Martínez, V., Delgado-Ospina, J., Ramírez-Navas, J. S., Flórez-López, E., Valdés-Restrepo, M. P., Grande-Tovar, C. D. y Chaves-López, C. (2021). Effect of pre-treatment with low-frequency ultrasound on quality parameters in gulupa (*Passiflora edulis* Sims) pulp. *Applied Sciences*, 11(4), 1-15. <https://doi.org/10.3390/app11041734>
- Chemat, F., Rombaut, N., Meullemiestre, A., Turk, M., Perino, S., Fabiano-Tixier, A.-S. y

- Abert-Vian, M. (2017). Review of green food processing techniques: Preservation, transformation, and extraction. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 357-377. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.016>
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S. y Abert-Vian, M. (2017, enero). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540-560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
- Cheng, C., Jia, M., Gui, Y. y Ma, Y. (2020). Comparison of the effects of novel processing technologies and conventional thermal pasteurisation on the nutritional quality and aroma of Mandarin (Citrus unshiu) juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 102425. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102425>
- D'Amico, P., Armani, A., Gianfaldoni, D. y Guidi A. (2016). New provisions for the labelling of fishery and aquaculture products: Difficulties in the implementation of regulation (EU) n. 1379/2013. *Marine Policy*, 71, 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.05.026>
- Fanzo, J., Haddad, L., Schneider, K. R., Béné, C., Covic, N. M., Guarin, A., Herforth, A. W., Herrero, M., Sumaila, U. R., Aburto, N. J., Amuyunzu-Nyamongo, M., Barquera, S., Battersby, J., Beal, T., Bizzotto Molina, P., Brusset, E., Cafiero, C., Campeau, C., Caron, P., ... y Rosero Moncayo, J. (2021). Viewpoint: Rigorous monitoring is necessary to guide food system transformation in the countdown to the 2030 global goals. *Food Policy*, 104, 102163. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102163>
- Faraday, M. (1850). Experimental researches in electricity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 140, 171-188. <https://doi.org/10.1098/rstl.1850.0008>
- Gabrić, D., Barba, F., Roohinejad, S., Gharibzadeh, S. M. T., Radojčin, M., Putnik, P. y Bursać Kovačević, D. (2018). Pulsed electric fields as an alternative to thermal processing for preservation of nutritive and physicochemical properties of beverages: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 41(1). <https://doi.org/10.1111/jfpe.12638>
- Gallego-Bono, J. y Tapia-Baranda, M. (2021). Industrial ecology and sustainable change: Inertia and transformation in Mexican agro-industrial sugarcane clusters. *European Planning Studies*, 30(7), 1271-1291. <https://doi.org/10.1080/09654313.2020.1869186>
- Hassoun, A., Prieto, M. A., Carpena, M., Bouzembrak, Y., Marvin, H. J. P., Pallarés, N., Barba, F. J., Punia Bangar, S., Chaudhary, V., Ibrahim, S. y Bono, G. (2022). Exploring the role of green and Industry 4.0 technologies in achieving sustainable development goals in food sectors. *Food Research International*, 162, 112068. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112068>
- He, X., Jia, G., Tatsumi, E. y Liu, H. (2016). Effect of corona wind, current, electric field and energy consumption on the reduction of the thawing time during the high-voltage electrostatic-field (HVEF) treatment process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 135-140. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.006>
- Hu, F., Qian, S., Huang, F., Han, D., Li, X. y Zhang, C. (2021, octubre). Combined impacts

- of low voltage electrostatic field and high humidity assisted-thawing on quality of pork steaks. *LWT*, 150, 111987. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111987>
- Huang, H., Gao, T., Qian, X., Wu, W., Fan, X., Shi, L., Xiong, G., Ding, A., Li, X., Qiao, Y., Liao, L. y Wang, L. (2022). In vitro antibacterial mechanism of high-voltage electrostatic field against *Acinetobacter johnsonii*. *Foods*, 11(7), 955. <https://doi.org/10.3390/foods11070955>
- Inácio, R. S., Fidalgo, L. G., Santos, M. D., Queirós, R. P. y Saraiva, J. A. (2014). Effect of high-pressure treatments on microbial loads and physicochemical characteristics during refrigerated storage of raw milk Serra da Estrela cheese samples. *International Journal of Food Science & Technology*, 49(5), 1272-1278.
- Karwacka, M., Ciurzyńska, A., Galus, S. y Janowicz, M. (2022). Freeze-dried snacks obtained from frozen vegetable by-products and apple pomace: Selected properties, energy consumption and carbon footprint. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 77, 102949. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102949>
- Komora, N., Maciel, C., Pinto, C. A., Ferreira, V., Brandão, T. R., Saraiva, J. M. y Teixeira, P. (2020). Non-thermal approach to *Listeria monocytogenes* inactivation in milk: The combined effect of high pressure, pediocin PA-1 and bacteriophage P100. *Food Microbiology*, 86, 103315.
- Kumar, K., Srivastav, S. y Sharanagat, V. S. (2021). Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105325. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105325>
- Li, M., Zhou, C., Wang, B., Zeng, S., Mu, R., Li, G., Li, B. y Lv, W. (2023). Research progress and application of ultrasonic-and microwave-assisted food processing technology. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(5), 3707-3731. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13198>
- Li, T., An, G., Sun, Q., Xu, T., Du, D., Zhang, Y., Chen, H. y Xia, G. (2023). Effects of high voltage electrostatic field and weak magnetic field assisted refrigeration on preservation of spinach. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(6), 6484-6502. <https://doi.org/10.1007/s11694-023-02119-9>
- Liu, J., Zhu, F., Yang, J., Wang, Y., Ma, X., Lou, Y. y Li, Y. (2023). Effects of high-voltage electrostatic field (HVEF) on frozen shrimp (*Solenocera melanthera*) based on UPLC-MS untargeted metabolism. *Food Chemistry*, 411, 135499. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135499>
- Lotfi, M., Hamdami, N., Dalvi-Isfahan, M. y Fallah-Joshaqani, S. (2022). Effects of high voltage electric field on storage life and antioxidant capacity of whole pomegranate fruit. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 75, 102888. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102888>
- López-Pedrouso, M., Díaz-Reinoso, B., Lorenzo, J. M., Cravotto, G., Barba, F. J., Moure, A., Domínguez, H. y Franco, D. (2019). Green technologies for food processing: Principal considerations. En *Innovative thermal and non-thermal processing, bioaccessibility and bioavailability of nutrients and bioactive compounds* (pp. 55-103). Woodhead. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814174-8.00003-2>

- Lu, Y., Jiang, Y., Wang, H., Yu, J., Hou, H., Rong, C., Liu, N. y Hao, Y. (2024). Effect of space electric field on the shelf-life extension of plum fruit (GuoFeng17). *Journal of Food Engineering*, 366, 111866. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111866>
- Manzoor, M. F., Siddique, R., Hussain, A., Ahmad, N., Rehman, A., Siddeeg, A., ... Yahya, M. A. (2021). Thermosonication effect on bioactive compounds, enzymes activity, particle size, microbial load, and sensory properties of almond (*Prunus dulcis*) milk. *Ultrasonics Sonochemistry*, 78, 105705. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105705>
- Manzoor, M. F., Xu, B., Khan, S., Shukat, R., Ahmad, N., Imran, M., ... Korma, S. A. (2021). Impact of high-intensity thermosonication treatment on spinach juice: Bioactive compounds, rheological, microbial, and enzymatic activities. *Ultrasonics Sonochemistry*, 78, 105740. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105740>
- Martínez-Acosta, M., Vázquez-Villegas, P., Mejía-Manzano, L. A., Soto-Inzunza, G. V., Ruiz-Aguilar, K. M., Kuhn Cuellar, L., Caratozzolo, P. y Membrillo-Hernández, J. (2023). The implementation of SDG12 in and from higher education institutions: Universities as laboratories for generating sustainable cities. *Frontiers in Sustainable Cities*, 5. <https://doi.org/10.3389/frsc.2023.1158464>
- Mgoma, S. T., Basitere, M., Mshayisa, V. V. y De Jager, D. (2025). A systematic review on sustainable extraction, preservation, and enhancement in food processing: The advancement from conventional to green technology through ultrasound. *Processes*, 13(4), 965. <https://doi.org/10.3390/pr13040965>
- Munir, M., Nadeem, M., Qureshi, T. M., Gamlath, C. J., Martin, G. J., Hemar, Y. y Ashokkumar, M. (2020). Effect of sonication, microwaves and high-pressure processing on ACE-inhibitory activity and antioxidant potential of Cheddar cheese during ripening. *Ultrasonics Sonochemistry*, 67, 105140.
- Norma Oficial Mexicana. (s/f). NOM-051-SCFI/SSA1-2010: Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcohólicas preenvasados: Información comercial y sanitaria.
- Organización de las Naciones Unidas, Asamblea General. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*.
- Pandiselvam, R., Mitharwal, S., Rani, P., Shanker, M. A., Kumar, A., Aslam, R., ... Mousavi Khaneghah, A. (2023). The influence of non-thermal technologies on color pigments of food materials: An updated review. *Current Research in Food Science*, 6, 100529. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100529>
- Patel, H. A., Carroll, T. y Kelly, A. L. (2015). Potential applications of nonthermal processing technologies in the dairy industry. En R. C. Chandan, A. Kilara y N. P. Shah (Eds.), *Dairy processing and quality assurance* (pp. 528-551). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118810279.ch22>
- Pattnaik, M., Pandey, P., Martin, G. J. O., Mishra, H. N. y Ashokkumar, M. (2021). Innovative technologies for extraction and microencapsulation of bioactives from plant-based food waste and their applications in functional food development. *Foods*, 10(2), art. 2. <https://doi.org/10.3390/foods10020279>
- Perera, C. O. y Alzahrani, M. A. J. (2021). Ultrasound as a pre-treatment for extraction of

- bioactive compounds and food safety: A review. *LWT*, 142, 111114. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111114>
- Pérez-Lamela, C., Franco, I. y Falqué, E. (2021). Impact of high-pressure processing on antioxidant activity during storage of fruits and fruit products: A review. *Molecules*, 26(17), 5265. <https://doi.org/10.3390/molecules26175265>
- Potter, C., Bastounis, A., Jebb, S. (2021). The effects of environmental sustainability labels on selection, purchase, and consumption of food and drink products: A systematic review. *Environmental and Behavior*, 53(8), 891-925. <https://doi.org/10.1177/0013916521995473>
- Punthi, F. yudhistira, B., Gavahian, M., Chang, C. K., Cheng, K. C., Hou, C. Y. y Hsieh, C. W. (2022). Pulsed electric field-assisted drying: A review of its underlying mechanisms, applications, and role in fresh produce plant-based food preservation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(6), 5109-5130. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13052>
- Qayum, A., Rashid, A., Liang, Q., Wu, Y., Cheng, Y., Kang, L., Liu, Y., Zhou, C., Hussain, M., Ren, X., Ashokkumar, M. y Ma, H. (2023). Ultrasonic and homogenization: An overview of the preparation of an edible protein-polysaccharide complex emulsion. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(6), 4242-4281. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13221>
- Qi, M., Liu, Q., Liu, Y. yan, H., Zhang, Y. y Yuan, Y. (2022). Staphylococcus aureus biofilm inhibition by high voltage prick electrostatic field (HVPEF) and the mechanism investigation. *International Journal of Food Microbiology*, 362, 109499. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109499>
- Qian, J., Chen, D., Zhang, Y., Gao, X., Xu, L., Guan, G. y Wang, F. (2023). Ultrasound-assisted enzymatic protein hydrolysis in food processing: Mechanism and parameters. *Foods*, 12(21), art. 21. <https://doi.org/10.3390/foods12214027>
- Rabbi, M. F. y Amin, M. Bin. (2024). Circular economy and sustainable practices in the food industry: A comprehensive bibliometric analysis. *Cleaner and Responsible Consumption*, 14, 100206. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100206>
- Reitz, J. R., Milford, F. J. y Christy, R. W. (1993). *Foundations of electromagnetic theory* (4ª ed.). Addison-Wesley.
- Roman, S., Sánchez-Siles, L. M. y Siegrist, M. (2017). The importance of food naturalness for consumers: Results of a systematic review. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 44-57.
- Safwa, S. M., Ahmed, T., Talukder, S., Sarker, A. y Rana, M. R. (2024). Applications of non-thermal technologies in food processing Industries-A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 100917. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100917>
- Sanz-Cañada, J. (2022). Innovación y alimentación sostenible, políticas y modelos cooperativos de logística y comercialización. *Mediterráneo Económico*, 35, 333-346.
- Shabir, I., Dash, K. K., Dar, A. H., Pandey, V. K., Fayaz, U., Srivastava, S. y R, N. (2023). Carbon footprints evaluation for sustainable food processing system development: A comprehensive review. *Future Foods*, 7, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100215>

- Shen, Y., Zhu, D., Xi, P., Cai, T., Cao, X., Liu, H. y Li, J. (2021). Effects of temperature-controlled ultrasound treatment on sensory properties, physical characteristics and antioxidant activity of cloudy apple juice. *LWT*, 142, 111030. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111030>
- Soquetta, M. B., Terra, Lisiane de Marsillac, y and Bastos, C. P. (2018). Green technologies for the extraction of bioactive compounds in fruits and vegetables. *CyTA: Journal of Food*, 16(1), 400-412. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1411978>
- The state of food security and nutrition in the world 2024*. (2024). FAO / IFAD / UNICEF / WFP / WHO. <https://doi.org/10.4060/cd1254en>
- Tubiello, F. N., Flammini, A., Karl, K., Obli-Laryea, G., Qiu, S. Y., Heiðarsdóttir, H., ... y Conchedda, G. (2021). *Methods for estimating greenhouse gas emissions from food systems, Part III: Energy use in fertilizer manufacturing, food processing, packaging, retail and household consumption*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7473en>
- Valdez-Miranda, J. I., Guitiérrez-López, G. F., Robles-de la Torre, R. R., Hernández-Sánchez, H. y Robles-López, M. R. (2024). Health benefits of high voltage electrostatic field processing of fruits and vegetables. *Plant Foods for Human Nutrition*, 79(2), 260-269. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01190-x>
- Valdez-Miranda, J. I., Robles-López, M. R., Robles-de-la-Torre, R. R., Alamilla-Beltrán, L., Hernández-Sánchez, H. y Gutiérrez-López, G. F. (2024). Effect of high-voltage electrostatic field treatments on bananas (*Musa paradisiaca* var. *sapientum*) on their postharvest quality, enzymatic activity and morphological changes. *Food and Bioproducts Processing*, 146, 135-146. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.05.007>
- Wang, G., Huang, J., Gao, W., Lu, J., Li, J., Liao, R. y Jaleel, C. A. (2009). The effect of high-voltage electrostatic field (HVEF) on aged rice (*Oryza sativa* L.) seeds vigor and lipid peroxidation of seedlings. *Journal of Electrostatics*, 67(5), 759-764. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2009.05.004>
- Wang, J., Liu, Q., Xie, B. y Sun, Z. (2020). Effect of ultrasound combined with ultraviolet treatment on microbial inactivation and quality properties of mango juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64, 105000. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105000>
- Xie, D., Rong, H., Xu, Y. yu, Y., Zou, B., Dai, F., Li, L., Peng, J. y Cheng, L. (2025). Impact of high-voltage electric field coupled with heat transfer medium on the thawing quality of lychee. *LWT*, 223, 117805. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117805>
- Xu, C., Zhang, X., Liang, J., Fu, Y., Wang, J., Jiang, M. y Pan, L. (2022). Cell wall and reactive oxygen metabolism responses of strawberry fruit during storage to low voltage electrostatic field treatment. *Postharvest Biology and Technology*, 192, 112017. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112017>
- Xu, Y., Leng, D., Li, X., Wang, D., Chai, X., Schroyen, M., Zhang, D. y Hou, C. (2024). Effects of different electrostatic field intensities assisted controlled freezing point storage on water holding capacity of fresh meat during the early postmortem period. *Food Chemistry*, 439, 138096. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138096>
- Yan, M. yuan, B., Xie, Y., Cheng, S., Huang, H., Zhang, W., Chen, J. y Cao, C. (2020). Improvement of postharvest quality, enzymes activity and polyphenoloxidase structure of postharvest *Agaricus bisporus* in response to high voltage electric field. *Posthar-*

- vest Biology and Technology*, 166, 111230. <https://doi.org/10.1016/j.postharv-bio.2020.111230>
- Younis, K., Jahan, K., Qadri, O. S., Osama, K. y Yousuf, O. (2025). Non-thermal processing techniques for sustainable food supply chains. *Sustainable Futures*, 9, 100658. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100658>
- Zhao, Y., Li, L., Gao, S., Wang, S., Li, X. y Xiong, X. (2023). Postharvest storage properties and quality kinetic models of cherry tomatoes treated by high-voltage electrostatic fields. *LWT*, 176, 114497. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114497>

10. El uso de suelo sustentable y la agricultura sustentable de México: Desafíos ambientales y sociales



MIGUEL ALVARADO CARDONA*
J. AURELIO COLMENERO ROBLES**
OBED PARDO SANTOS***

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.370.10>

Resumen

México se localiza al sur de América del Norte. La sustentabilidad es un principio con una estrecha relación entre la economía, la sociedad, el medio ambiente y la conservación de la biodiversidad. La agricultura sustentable, bajo este principio, se centra en satisfacer las necesidades alimentarias actuales sin comprometer la de las futuras generaciones. Las técnicas de sustentabilidad agrícola desarrollan programas de conservación y protección del suelo, pero su implementación es atomizada, de tal forma que origina problemáticas de suelo que se manifiestan en tipos de degradación física (erosión), química (sales y compuestos tóxicos) y biológica (pérdida de flora y fauna). Lo anterior supone que estos tipos de degradación limitan el desarrollo de una agricultura sustentable.

Con el fin de mostrar que en México la agricultura sustentable no se ha desarrollado plenamente en la actualidad, se llevó a cabo una recopilación de información, caracterización y una etapa de análisis. La superficie agrí-

* Maestro en Ciencias. Profesor del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9747-260X> ; correo electrónico: maalvarado@ipn.mx

** Licenciado en Biología. Analista en la Secretaría de Investigaciones y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4959-7963>

*** Maestro en Administración y Políticas Públicas. Investigador en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4341-9368>

cola en México es de 32.1 millones de hectáreas, el 26.8% es de riego y el 73.2% es de temporal; un aspecto adicional consiste en que el 85% de los suelos presenta degradación física y el 95% degradación química: la superficie dedicada a la agricultura orgánica es de 169 000 ha y 47 795 ha suelen considerarse sustentables. Si los suelos se encuentran en fase de degradación física y química, la agricultura sustentable no existe.

Palabras clave: *agricultura sustentable, degradación física y química, México, agricultura orgánica, conservación de suelos.*

Introducción

Localización

México se localiza al Sur de América del Norte, con coordenadas geográficas de 32° 43' 06" latitud norte, 14° 32' 27" latitud sur, 118° 22' 00" y 86° 42' 36" longitud oeste. La superficie territorial cubre una extensión de 1 959 248 km². Comparte frontera al norte con los Estados Unidos de América y al sur con Guatemala y Belice, distribuidos de la siguiente forma: con Estados Unidos cubre la línea fronteriza a lo largo de 3 152 km; con Guatemala cubre una línea fronteriza de 956 km de extensión y con Belice la división territorial es de 193 km lineales (Semarnat, 2010).

Conceptos

La sustentabilidad consiste en el hecho que la economía y la sociedad se desarrollan sin degradar la biodiversidad, el suelo y el clima, a lo largo de 3 152 km, desde el Monumento 258, al noroeste de Tijuana, hasta la desembocadura del río Bravo en el Golfo de México. El río Bravo, también conocido como Río Grande, cubre el 70.4% de esta línea divisoria internacional, 2012). La agricultura sustentable se centra en satisfacer las necesidades alimentarias actuales, sin comprometer la disponibilidad para las de futuras generaciones. La conservación del suelo es un conjunto de prácticas esen-

ciales para la agricultura sustentable. Los organismos internacionales como ODSN, CIGA, IG, PUEIS y la FAO sostienen que la sustentabilidad de los suelos contribuye a la producción alimentaria (Alcaldía de Medellín, 2025).

El problema

En México la aplicación de técnicas de sustentabilidad agrícola, los programas de conservación y protección del suelo, el uso del suelo, llevados a cabo de manera inadecuada, han originado una problemática que se manifiesta en degradación física (erosión), química (sales) y biológica (pérdida de cobertura vegetal, pérdida flora y fauna) de persistir esta tendencia las generaciones futuras no dispondrán de una seguridad alimentaria.

Hipótesis

Esta investigación caracteriza los diferentes tipos de agricultura, en particular la sustentable, mediante un análisis sobre la conservación, el uso actual, la degradación física y química del suelo como un recurso natural; lo anterior presupone que la agricultura en México se encuentra en riesgo de no lograr la sustentabilidad.

Objetivo general

En esta investigación se llevará a cabo la recopilación de información a partir de la obra editorial de organismos públicos y privados que caracteriza a la agricultura sustentable, para revisar los distintos usos de suelo a nivel nacional de todos aquellos factores que determinan la degradación de física, química y biológica.

Objetivos específicos

- Mostrar las características de los tipos de agricultura en México.
- Identificar los suelos que hay en México.
- Presentar la degradación de los suelos por entidad federativa a nivel nacional.
- Identificar qué técnicas y programas aplicados a la conservación de suelos.
- Mostrar que en México la agricultura no es sustentable.

Desarrollo de la metodología

Para probar la hipótesis y cumplir con los objetivos, se aplicó un procedimiento metodológico integrado por varias etapas: la primera fue recopilación de la información, como bibliografía, cartografía, fotos aéreas e imágenes de satélite, la siguiente es la descripción de las características de la agricultura de temporal, riego, orgánica y la sustentable, de los grupos de uso de suelo en México, para esto se utilizó la información recopilada, en la última etapa se analizó de degradación y conservación para mostrar que la agricultura en México no es sustentable.

Fase recopilación de información

Para cumplir con los objetivos y probar la hipótesis, se recopiló información bibliográfica, obtenida a partir de consulta en la web, como tesis, artículos, capítulos de libro, blog, cartografía de temáticas, edafológicas, topográficas, fotos aéreas de escalas 1:50 000 e imágenes Landsat del portal web Google Earth Pro. Se consultaron las obras editoriales de organismos tanto públicos como privados: INEGI, Conapo, Semarnat, Conabio, Sagarpa, SADER y FAO.

Fase de caracterización

La agricultura

La agricultura también comprende el cultivo de distintas plantas ornamentales como claveles, rosas, semillas de girasol, calabaza y nueces, frutos de mango, manzanas, para proveer de alimentos al ser humano o al ganado y de materias primas a la industria, México es cuna de la agricultura mesoamericana donde se domesticaron plantas como el maíz, el frijol, el chile, el tomate verde y las calabazas (INEGI, 2022).

En México se dispone, principalmente, de cuatro tipos de agricultura: de temporal, de riego, orgánica y sustentable.

Agricultura de temporal

La SADER (2016) ha documentado que, en la agricultura de temporal la producción depende de los elementos del clima como la lluvia, la capacidad del suelo para captar el agua y la fertilidad. La inversión económica es menor al no tener que invertir en el tema de riego. Los cultivos con ciclo temporal anual son maíz, limón, sorgo, trigo, garbanzo y frijol. Esta clase de agricultura ocupa una superficie del 74.20% a nivel nacional (Bastida, 2023).

La agricultura de riego

Este tipo de agricultura no depende de la temporada de lluvias, ya que se dispone de un sistema de riego para la producción agrícola, con esto se asegura el suministro permanente de agua, cultivándose alfalfa, tomate, jitomate, chiles, forrajes, entre otros. En este tipo de agricultura, los sistemas de riego optimizan la disponibilidad del agua. La superficie de irrigación ocupa una superficie de 66 839 km² (26%) (INEGI, 2022).

La agricultura orgánica

Es un sistema de producción agrícola que prioriza el uso de métodos naturales y la salud del suelo, evitando el uso de fertilizantes y pesticidas sintéticos, promoviendo la biodiversidad y la sustentabilidad.

Principales características

Se basa en el uso de insumos agrícolas que se adapten a las condiciones regionales, se enfoca en la productividad sustentable, se basa en la rotación de cultivos, preserva la calidad de los alimentos, disminuye los costos energéticos. En este tipo de agricultura sobresalen: café, aguacate, cártamo, mango, chía, zarzamora, naranja, garbanzo, tomate y maíz. Chiapas, Baja California y Oaxaca son los estados con mayor producción de cultivos orgánicos, la superficie cultivable es de 169 000 ha dedicadas a este tipo modalidad (SADER, 2022).

Agricultura sustentable

La agricultura sustentable se centra en satisfacer las necesidades actuales sin comprometer a las futuras generaciones. Se manifiesta en la conservación y protección de la biodiversidad, la preservación de semillas nativas y el fomento de la agricultura orgánica. Los principales objetivos de esta modalidad de agricultura son el desarrollo rural sustentable, aumentar la producción de alimentos y mejorar la seguridad alimentaria.

Como la agricultura sustentable depende en gran medida de los servicios proporcionados por los ecosistemas, este tipo de agricultura debe reducir al mínimo los impactos ambientales negativos y simultáneamente, optimizar la producción protegiendo, conservando y mejorando los recursos naturales y utilizándolos en forma eficiente (FAO, 2015).

Fase de análisis

Conservación de suelos

La conservación del suelo y del agua (swc, Asociación Mundial de la Conservación del Suelo y del Ambiente). En el contexto de WOCAT, se define como: las actividades a nivel local que mantienen o aumentan la capacidad del suelo. Las tecnologías de swc son medidas agronómicas, vegetativas, estructurales, la gestión que controlan la degradación del suelo y aumentan la productividad del campo, adicionalmente, incluye la prevención o la reducción de erosión del suelo, y la consolidación.

Programa de Agricultura Sostenible

El gobierno de México tiene varios programas para promover la agricultura sustentable; además, ha propuesto varios programas para fomentar la agricultura sustentable en el país, para brindar asistencia técnica y capacitación a los agricultores en prácticas agrícolas sostenibles y se han establecido incentivos económicos para promover la adopción de prácticas sostenibles (The Food Tech, 2023). El Programa de Rehabilitación y Conservación de Suelos, para el año de 2001 permitió el apoyo de 54 solicitudes en labores y prácticas para el mejoramiento y recuperación de suelos (Sagarpa Jalisco, 2002).

Programa de Sustentabilidad Agrícola

El objetivo del Programa de Sustentabilidad Agrícola es generar productos alimenticios de alta calidad, evitando alterar el equilibrio del medio ambiente, utilizando adecuadamente los recursos naturales y manteniendo su integridad para generaciones futuras. Los principales beneficios del programa incluyen: la reducción de costos para el proveedor, la reducción del impac-

to ambiental y la generación de materias primas agrícolas de mayor calidad (World Resources Institute, 2025).

Los programas operados por la Semarnat (incluyendo los de la Conafor, Sagarpa y Conaza) brindan apoyo económico y técnico a los productores, para la realización de obras hidráulicas, de reforestación, de conservación y restauración de suelos y manejo de tierras agrícolas que contribuyan a la conservación de este importante recurso natural.

En México, cinco estados concentran la mayor producción agrícola, Jalisco, Veracruz, Oaxaca, Chihuahua y Sinaloa. La agricultura sustentable promueve técnicas de conservación de suelos como rotación de cultivo, franjas en contorno, cercas vivas, presas de gavión, siembra al voleo, por citar algunas.

Técnicas de conservación de suelos

La conservación del suelo es un punto clave de la agricultura tradicional, la agricultura ecológica y sustentable, dando lugar a la conservación del suelo apropiada, obteniéndose buenos rendimientos tanto en el presente como el futuro, sin tener que depender de productos químicos, reduciendo la erosión y manteniendo la fertilidad. El concepto de conservación del suelo hace referencia a un conjunto de técnicas y prácticas agrícolas que evitan la degradación mediante la labranza de conservación, siembra directa, rotación de cultivos, no usar agroquímicos, agricultura de contorno, cultivos en franja, cultivos de cobertura, conservación de los organismos del suelo, por citar algunas (Cherlinka, 2025).

La conservación del suelo: cómo manejarla e implementarla

Las entidades federativas que aplican técnicas de conservación de suelos son puntuales, los ejemplos representan algunos sitios de Chipas, Oaxaca, Veracruz, Jalisco, San Luis Potosí, Guanajuato, Colima, Querétaro, Aguas calientes, Querétaro, Puebla y Tlaxcala.

Degradación de los suelos

El reconocimiento de los 32 grupos de suelos que considera la FAO (2014), en México predominan los Leptosoles, Phaeozem y Vertisoles, el primero presenta limitantes para actividad agrícola por la degradación física (erosión) y química (contaminación), los dos siguientes presentan las mejores condiciones de fertilidad para el desarrollo de cultivos.

Limitantes de la agricultura sustentable

Para que un suelo agrícola sea sustentable es necesaria su conservación y evitar su degradación, a continuación, se presentan las principales causas (tabla 10.1).

Tabla 10.1. *Limitantes que inciden en la agricultura sustentable*

<i>Limitantes físicas</i>	<i>Limitantes químicas</i>	<i>Limitantes biológicas</i>
Erosión de suelos	Fertilizante	Pérdida de fauna y flora
Compactación	Plaguicidas	Pérdida de hongos y bacterias
Pérdida de poros	Herbicidas y metales pesados	
Pérdida de la capacidad en la fertilidad	Presencia de hidrocarburos	
Pérdida de almacenamiento agua	Aguas residuales	

Fuente: elaboración propia.

Degradación física

Esta condición se define como la pérdida de la calidad de la estructura del suelo. Se observa tanto en la superficie como en el surgimiento de finas costras. La deforestación, la erosión hídrica, eólica, falta de rotación de cultivos, labranza excesiva y el uso prácticas agrícolas intensivas inadecuadas, han llevado a una disminución significativa de la fertilidad del suelo. La pérdida de nutrientes y la compactación del suelo reducen la capacidad de los cultivos contribuyendo, todo esto a una agricultura insustentable. La degradación del suelo es otro el reto que enfrenta la agricultura mexicana.

Erosión hídrica

La pérdida de las capas superficiales del suelo favorece el desplazamiento del agua sobre la superficie, desfavoreciendo la capacidad de humedad en sus capas internas. En México el caso de la erosión hídrica representa el 88% de la superficie nacional.

Erosión eólica

Etimológicamente la palabra eólica viene derivada de Eolo, dios del viento. Cuando hablamos de erosión eólica nos referimos a aquellos procesos de deterioro o degradación que vienen dados por la acción del viento, evento que modifica el relieve de la corteza terrestre (Roper, 2020).

En México, la erosión eólica, causada por el viento, afecta aproximadamente el 23.25% de la superficie nacional, especialmente en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas. Se estima que 18.12 millones de hectáreas, lo que equivale al 9.5% del territorio.

Degradación física

En la tabla 10.2 se observa el uso del suelo por estado, grados y formas de erosión.

Tabla 10.2. *Degradación física del suelo en cada entidad federativa*

Estado	Uso del suelo y vegetación	Grados de erosión	Formas de erosión
Baja California	Bosque, agricultura y ganadería	Fuerte > a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas. Erosión eólica y dunas.
Baja California Sur	Bosque, agricultura y ganadería	Fuerte > a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas. Erosión eólica, dunas.

<i>Estado</i>	<i>Uso del suelo y vegetación</i>	<i>Grados de erosión</i>	<i>Formas de erosión</i>
Sonora	Agricultura, ganadería y bosque	Fuerte > a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas. Erosión eólica: dunas.
Chihuahua	Agricultura y ganadería y bosque	Fuerte > a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas. Erosión eólica: dunas.
Coahuila	Bosque, agricultura y ganadería	Fuerte > a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: cárcavas, láminas y barrancas. Erosión eólica: dunas.
Nuevo León	Bosque, agricultura y ganadería	Moderada 51 a 100 ton/ha/año	Erosión, hídrica: barrancas, cárcavas y láminas.
Tamaulipas	Agricultura, ganadería y bosque	Moderada 51 a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas.
Sinaloa	Agricultura, ganadería y bosque	Moderada 51 a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas.
Durango	Agricultura, ganadería y bosque	Moderada 51 a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas.
Zacatecas	Agricultura, ganadería y bosque	Moderada 51 a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas.
San Luis Potosí	Bosque, agricultura y ganadería	Moderada 51 a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: cárcavas, láminas y barrancas.
Nayarit	Bosque, agricultura y ganadería	Moderada 51 a 100 ton/ha/año	Erosión, hídrica: barrancas, cárcavas y laminas.
Aguascalientes	Agricultura, ganadería y bosque	Moderada 51 a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas.
Jalisco	Agricultura, ganadería y bosque	Moderada 51 a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas.
Guanajuato	Agricultura, ganadería y bosque	Moderada 51 a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: láminas, cárcavas y barrancas.
Querétaro	Bosque, agricultura y ganadería	Moderada 51 a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: láminas, cárcavas y barrancas.
Hidalgo	Bosque, agricultura y ganadería	Moderada 51 a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: láminas, cárcavas y barrancas.
Colima	Bosque, agricultura y ganadería	Moderada 51 a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: cárcavas, láminas y barrancas.

<i>Estado</i>	<i>Uso del suelo y vegetación</i>	<i>Grados de erosión</i>	<i>Formas de erosión</i>
Michoacán	Bosque, agricultura y ganadería	Fuerte > a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas.
Estado de México	Agricultura, ganadería y bosque	Fuerte > a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: cárcavas, láminas y barrancas.
Ciudad de México	zona urbana, bosque y agricultura	Fuerte > a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: láminas, cárcavas y barrancas.
Morelos	Bosque, agricultura y ganadería	Fuerte > a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas.
Tlaxcala	Agricultura, ganadería y bosque	Fuerte > a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: cárcavas, láminas y barrancas.
Puebla	Bosque, agricultura y ganadería	Fuerte > a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas.
Veracruz	Agricultura y ganadería y bosque	Ligera 0 a 50 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas.
Guerrero	Bosque, agricultura y ganadería	Fuerte > a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y laminas.
Oaxaca	Bosque, agricultura y ganadería	Fuerte > a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y laminas.
Tabasco	Bosque, agricultura y ganadería	Ligera 0 a 50 ton/ha/año	Sin erosión aparente.
Campeche	Agricultura, ganadería y bosque	Ligera 0 a 50 ton/ha/año	Sin erosión aparente.
Chiapas	Bosque, agricultura y ganadería	Fuerte > a 100 ton/ha/año	Erosión hídrica: barrancas, cárcavas y láminas.
Yucatán	Bosque, agricultura y ganadería	Ligera 0 a 50 ton/ha/año	Erosión hídrica: láminas, cárcavas y barrancas.
Quintana Roo	Bosque, agricultura y ganadería	Ligera 0 a 50 ton/ha/año	Sin erosión aparente.

Fuente: elaboración propia con información de las imágenes del satélite Landsat, Google Earth (2024).

Degradación química

En la tabla 10.3 se tiene los usos del suelo y vegetación, principales contaminantes y ubicación en cada uno de los 32 estados de México.

Tabla 10.3. *Los estados de México con suelos afectados por degradación química*

<i>Estado</i>	<i>Usos del suelo y vegetación</i>	<i>Principales contaminantes y grado de alteración</i>	<i>Ubicación</i>
Baja California	Agricultura	Sales y sodio, moderada, agricultura intensiva, carbonatos, fósforo, cadmio, cloro, plomo, mercurio y zinc.	Desierto del Vizcaíno, Mexicali, Ciudad Coahuila y San Quintín.
Baja California Sur	Agricultura	Sales y sodio, moderada alcalinización, carbonatos, fósforo, cadmio, cloro, plomo, mercurio y zinc.	Desierto del Vizcaíno, Zaragoza, Ciudad Insurgentes, Ciudad Constitución y El Pescadero.
Sonora	Agricultura	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio, cloro, plomo, mercurio y zinc.	Desierto de Altar, Miguel Alemán, Hermosillo, Villa Juárez y Ciudad Obregón.
Chihuahua	Agricultura	Sales y sodio, contaminación por carbonatos, fósforo, cadmio, cloro, plomo, mercurio, zinc, materia orgánica, grasas y aceites.	Norte y Sur de Chihuahua, Ascensión, Janos, Moctezuma, Sueco, Santana, Oasis y Delicias.
Coahuila	Agricultura y ganadería	Sales y sodio, materia orgánica, materia orgánica, grasas y aceites.	Boquillas del Carmen, Torreón, Francisco Madero y Matamoros.
Nuevo León	Agricultura y ganadería	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio, cloro, plomo, mercurio, zinc, materia orgánica, grasas y aceites.	Dr. Arroyo, Mier y Noriega, José Quintero, El Puerto, Anáhuac, Genaro Pérez, El Arroyo de los Sauces, Ciudad General Terán y Los Herrera.
Tamaulipas	Agricultura	Sales y sodio, materia orgánica, grasas, aceites, materia orgánica, grasas y aceite.	Camargo, Baladeces, Ciudad Gustavo Díaz Ordaz, Empalme, Valle Hermoso, El Moquetito, La Lomita y Ejido Miguel Hidalgo.
Sinaloa	Agricultura	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio, zinc, plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas, aceites y agricultura intensiva.	El Fuerte, Los Mochis, Guamúchil, Culiacán, Costa Rica, Dimas y El Quelite.
Durango	Agricultura y ganadería	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio, zinc, plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas, aceites y agricultura intensiva.	Gómez Palacio, Santiago Papasquiaro, El Nayar, Guadalupe Victoria, Canatlan, Villa Unión y Vicente Guerrero.

<i>Estado</i>	<i>Usos del suelo y vegetación</i>	<i>Principales contaminantes y grado de alteración</i>	<i>Ubicación</i>
Zacatecas	Agricultura	Sales y sodio, contaminación por arsénico y plomo, sobre, orgánica, grasas, aceites y agricultura intensiva.	Norte del estado, Juan Aldama, Chahuities, Frenillo y Víctor Rosales.
San Luis Potosí	Agricultura y ganadería	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio, zinc, plomo y mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites	Villa de la Paz y Mathuala, Charcas, Salinas Hidalgo, Ahualulco, Río Verde y Cárdenas.
Nayarit	Agricultura y ganadería	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio, zinc, plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	Llanuras Costeras del Pacífico, Tecuala, Santiago Ixcuintla, Tepic, Ixtlán del Río y Punta Mitla.
Aguascalientes	Agricultura	Plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	Valle de Aguascalientes, Rincón de Romos, Calvillo y Jesús María.
Jalisco	Agricultura	Sales y sodio, plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	Llanuras de Sayula, Tecuala, Zapopan, Tepatitlán, Lagos de Moreno y Ameca.
Guanajuato	Agricultura	Sales y sodio, plomo, mercurio cloro, materia orgánica, grasas y aceites	Al Este del estado, Irapuato, Moro León, Salamanca, Pénjamo y Acámbaro.
Querétaro	Agricultura y ganadería	Sales y sodio, plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	San Juan del Río, Colón, Tequisquiapan, Cadereyta y Chichimequillas.
Hidalgo	Agricultura	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites	Oeste del estado, Valle de Tulancingo y el Altiplano, el estado presenta un 95% de degradación.
Colima	Agricultura	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio plomo, mercurio, cloro y materia orgánica.	Armería, Colima, Cómala, Tecomán e Ixtlahuaca.
Michoacán	Agricultura	Sales y sodio, carbonatos, fosforo, cadmio plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites	Lago de Pátzcuaro, Miramar, con 55% de la superficie del estado.
Estado de México	Agricultura	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	Chalco y Cuautitlán.

<i>Estado</i>	<i>Usos del suelo y vegetación</i>	<i>Principales contaminantes y grado de alteración</i>	<i>Ubicación</i>
Ciudad de México	Agricultura y pastizales	Sales y sodio, plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	Lago de Texcoco.
Morelos	Agricultura	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	Yecapixtla, Tepalcingo, Tepoztlán y Jojutla.
Tlaxcala	Agricultura	Sales y sodio, cadmio plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	Tlaxco, Terrenate y Calpulalpan.
Puebla	Agricultura y ganadería	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	Sur del estado, Atlixco, Tecamachalco, Cholula, Tehuacán y Libres.
Veracruz	Agricultura	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	Costera, Panuco, Temporal, Naranjos y Álamo.
Guerrero	Agricultura y ganadería	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio plomo, orgánica, grasas y aceites.	Papantla, Coyuca de Benítez, Tlapa, Taxco y Ciudad Altamirano.
Oaxaca	Agricultura	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	Colotepec, Miahuatlán, Santa Cruz, Oaxaca de Juárez, Asunción y Nochixtlán.
Tabasco	Agricultura y ganadería	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	Laguna de Términos, Comalcalco, Las Choapas, La Venta. Macuspana y Frontera.
Campeche	Agricultura	Sales y sodio, carbonatos, fósforo, cadmio plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	Palizada, Candelaria, Palizada, Sabancu y Hopelchen. El 70% de los suelos presenta degradación.
Chiapas	Agricultura y ganadería	Sales y sodio, fósforo, cadmio plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	Chapa de Corzo, Villa flores y Pichucalco. El 70% de los suelos con degradación, Puerto Arista y Pijijiapan.
Yucatán	Agricultura	Sales y sodio, fósforo, cadmio plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	Llanura Costera, Maxcanú, Dzidzantún, Buctzotz y Tekax.

<i>Estado</i>	<i>Usos del suelo y vegetación</i>	<i>Principales contaminantes y grado de alteración</i>	<i>Ubicación</i>
Quintana Roo	Agricultura y ganadería	Salas y sodio, fósforo, cadmio plomo, mercurio, cloro, materia orgánica, grasas y aceites.	San Fernando, Progreso, Juárez y Emiliano Zapata.

Fuente: elaboración propia con información del proyecto clave SIP 20180582 “Conservación y uso sustentable de los suelos de México” del IPN.

Compactación del suelo

En México, los suelos compactados son un problema común que afecta significativamente la agricultura y el desarrollo de las plantas. Se estima que cerca del 64% de los suelos en México están deteriorados. La compactación es un factor que alcanza el 83.3 y el 94.6% en el subsuelo (piso de arado). La compactación se presenta en las zonas agrícolas de riego donde se utiliza maquinaria pesada como sembradoras, cosechadoras, pulverizadoras y maquinaria de labranza. Los estados con agricultura de riego son Chihuahua, Michoacán, Sinaloa, Durango, Tamaulipas, Estado de México, Tlaxcala, Hidalgo, Puebla, Chiapas, Nuevo León y Oaxaca (Semarnat, 2010).

Degradación biológica del suelo

La degradación biológica implica la disminución de la actividad microbiana debido a reacciones bioquímicas, especialmente en las tierras desnudas y/o desprotegidas, reduce el rendimiento y hace que la tierra sea menos apta para el cultivo (Kogut, 2025). El suelo erosionado pierde la cobertura vegetal y en el subsuelo disminuye la presencia de hongos y bacterias.

El impacto ambiental de la actividad agrícola

La actividad agrícola tiene impactos ambientales significativos, tanto positivos como negativos. Entre los impactos negativos se encuentran la contaminación del agua y el suelo por el uso de fertilizantes y pesticidas. Entre

otras causas, incluye la deforestación, la erosión y pérdida de nutrientes, la emisión de gases de efecto invernadero, por ejemplo el metano. Por otro lado, la agricultura puede tener impactos positivos como la captura de carbono, la mejora de la infiltración del agua, la conservación de paisajes rurales y seguridad alimentaria.

Aguas residuales

Son las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos domésticos, municipales, industriales, comerciales, servicios generales, agrícolas, pecuario y en general de cualquier otro uso (Cisneros y Saucedo, 2016). El exceso de contenido de metales pesados puede degradar químicamente el suelo a través del riego por esta clase de aguas, por lo tanto, afectan la calidad y seguridad de los alimentos, cuando se aplican incorrectamente en la agricultura. Asimismo, el uso de aguas residuales, dependiendo del nivel de tratamiento, aún puede contener patógenos (virus, bacterias y protozoos), por ello, son un grave riesgo para la salud humana (Mendoza, 2021).

Uso del agua residual en la agricultura

Se estima que más de 300 mil hectáreas de tierras agrícolas en todo el país se riegan con aguas residuales. La agricultura puede resultar en la transmisión de enfermedades a través de los alimentos, la contaminación de los suelos y cuerpos de agua cercanos (Evaristo, A. 2024). Los estados de la República Mexicana que utilizan aguas residuales en la agricultura son Jalisco, Hidalgo, Querétaro, Oaxaca, Estado de México, Tlaxcala y Sonora.

Algunos estudios de caso

Los suelos de planicie aluvial costera de Colotepec, Oaxaca, con deficiente drenaje natural, irrigados con aguas de pozo de moderada salinidad acumulan sales en sus 20 cm superiores del suelo. Como alternativa de uso

sustentable se recomienda la remoción de las sales mediante su lixiviación con aguas residuales tratadas (Sánchez et al., 2012).

En el estado de Puebla existen gasoductos que atraviesan muchas localidades, entre ellas se encuentra Acatzingo, donde se han detectado varios derrames de hidrocarburos de mediano y alto peso molecular. Este tipo de hidrocarburos corresponde a los poliaromáticos, que tienen una naturaleza química hidrofóbica y son adsorbidos en el suelo (Cavazos et al., 2014).

En el municipio de Tepeaca (Puebla)

Se han utilizado plaguicidas organoclorados en el cultivo de alfalfa, maíz, col (repollo) y coliflor, los cuales se mantienen en el suelo la concentración inicial de hidrocarburos y los plaguicidas OCs como heptacordo, aldrín y transclordano (Islas, 2015).

En la Ciudad de Oaxaca

En una Zona Conurbada de la Ciudad de Oaxaca (ZIARM) se utiliza en la alfarería el óxido de plomo como esmalte, en el análisis de suelo se observa que las concentraciones de Ba y Be fueron mayores; en cambio, el contenido de manganeso fue significativamente alto, bajo en las arcillas bajo pH medianamente alcalino y altas concentraciones de materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y Ca_2^+ y Mg_2^+ intercambiables (Bautista et al., 2010).

Ciudad Industrial Xicohténcatl I (Tlaxcala)

Esta zona industrial es el corredor principal con alrededor de 52 empresas del tipo metalmecánico, químico, textil, metal básico, eléctrico y mineral no metálico. Este complejo industrial genera una importante cantidad de aguas residuales con una alta concentración de elementos como Fe, Cu, Mn y Zn que contaminan el suelo (García, 2014).

Resultados

Los distintos datos expuestos en este estudio permiten considerar que el suelo presenta con mayor incidencia la degradación física y química. Se comprueba la hipótesis de que sí existe una problemática ambiental. La superficie agrícola de México es de 32.1 millones de hectáreas de acuerdo con el Censo Agropecuario realizado por el INEGI (2022). En ese año, el 26.8% correspondió a la superficie de riego y el 73.2% para la agricultura de temporal. En cinco estados: Jalisco, Veracruz, Oaxaca, Chihuahua y Sinaloa se concentra la mayor producción agrícola; sin embargo, solamente el 37% de las entidades federativas aplican técnicas de conservación de suelos.

La agricultura sustentable es prioridad para varios países como Francia, España, Colombia, Argentina y México. Las organizaciones gubernamentales de estos países argumentan que la conservación y las buenas prácticas agrícolas contribuyen a la producción y sustentabilidad alimentaria.

Los programas diseñados por la Semarnat, Conafor y Sagarpa están orientados a fomentar la agricultura sustentable, brindando asistencia técnica, capacitación e incentivos económicos y un cumplimiento mínimo de prácticas agrícolas sustentables; sin embargo, la superficie dedicada a la agricultura orgánica está representada en solo 69 000 ha; en tanto, la agricultura sustentable no rebaza la cantidad de 47 795 hectáreas.

Los programas de conservación de suelos no contienen propuestas de Técnicas de Agricultura Sustentable, entre las que destacan, la rotación de cultivos, conservación del suelo, uso de abonos orgánicos, siembra directa, compostaje, agroforestería y control integrado de plagas.

La información contenida en las tablas 2 y 3 corrobora que más del 85% de los estados del país presenta degradación física. Los estados con suelos con mayor degradación física son Tlaxcala, Puebla, Zacatecas, Durango, Querétaro, Nuevo León, Michoacán, Estado de México, Morelos, Baja California y Baja California Sur, con un valor de 51 a 100 ton/ha/año. Los menos erosionados (ligera 0 a 50 ton/ha/año) corresponden a Colima, Nayarit, Aguascalientes, Coahuila, San Luis Potosí, Chihuahua y Jalisco. El 83.3% del territorio mexicano presenta compactación superficial y 94.6% en el subsuelo (piso de arado).

En México, existen pocos casos exitosos en la implementación de prácticas agrícolas sustentables. En el estado de Oaxaca, un pequeño grupo de agricultores han adoptado técnicas agroecológicas. En Chiapas, otros productores también han aplicado las mismas técnicas.

Más de 300 mil hectáreas de tierras agrícolas en todo el país se riegan con aguas residuales principalmente en los estados Jalisco, Hidalgo, Querétaro, Oaxaca, Estado de México, Tlaxcala y Sonora, contaminando tanto el suelo como el agua.

La erosión hídrica es la dominante, ya que el 100% de los estados de la República Mexicana presentan erosión hídrica en diferente forma (láminas, cárcava y barrancas). Los grados de erosión hídrica se clasifican en la escala de fuerte, con la pérdida de suelos suele ser mayor a 100 ton/ha/año. La erosión eólica sólo representa el 18% en forma de dunas.

En México hay 22 grupos de suelo, el Leptosol es el tipo dominante y menos productivo, los Phaeozems y Vertisol tiene alto potencial agrícola. El 92% de los suelos de las entidades federativas de México están contaminadas con sales, sodio, carbonatos, fósforo, cadmio, cloro, plomo, mercurio y zinc. Los suelos de la planicie aluvial costera de Colotepec, Oaxaca, presentan un deficiente drenaje, son irrigada con aguas de pozo de moderada salinidad y acumulan sales en sus 20 cm superiores del suelo.

La degradación química

Por sus características, fertilizantes, plaguicidas, herbicidas, aguas residuales y metales pesados son las principales sustancias que originan la degradación química. A nivel nacional, el 95% de los suelos presenta determinado nivel de degradación química.

Las entidades federativas de México que usan aguas residuales en la agricultura son Jalisco, Hidalgo, Querétaro, Oaxaca, Estado de México Tlaxcala y Sonora. En el estado de Puebla existen gasoductos que cruzan el Municipio de Acatzingo; ahí se han detectado varios derrames de hidrocarburos de mediano y alto peso molecular, entre ellos los compuestos poliaromáticos, los cuales tienen una naturaleza química hidrofóbica y son adsorbidos en suelos.

En el municipio de Tepeaca (Puebla), los productores utilizan ampliamente plaguicidas organoclorados sobre los cultivares de alfalfa, maíz, col (repollo) y coliflor. Estos compuestos también se incorporan al suelo.

Conclusiones

La agricultura de México es afectada por la degradación química del suelo al utilizar agroquímicos como fertilizantes, herbicidas y fungicidas; los suelos son afectados físicamente por la erosión y la compactación; asimismo los suelos se degradan biológicamente cuando se erosionan, pierden su cobertura vegetal, fauna, flora microscópica como hongos y bacterias, con esto se prueba la hipótesis de que la agricultura en México no es sustentable.

Se cumple con objetivo general al demostrar que la degradación física, química y biológica de los suelos es producto de la actividad agrícola de México llevada a cabo de manera inadecuada. En el plano gubernamental se presenta la carencia de programas y escasas técnicas de conservación de suelos; si se continua con esta tendencia, las generaciones futuras no contarán con alimentos de buena calidad con lo que se pone en riesgo la seguridad alimentaria en nuestro país.

Referencias

- Alcaldía de Medellín. (2025). La agricultura sostenible: Clave en el bienestar de las sociedades. <https://www.medellin.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias/la-agricultura-sostenible-clave-en-el-bienestar-de-las-sociedades>
- Bastida, A. (2023). Qué es la agricultura de temporal y cuál es su importancia. <https://blogagricultura.com/importancia-agricultura-temporal>
- Bautista, A., Arnaud, M. y Carrillo, R. (2010). Elementos traza en dos áreas agrícolas. *Terra Latinoamericana*, 29(2), 123-131. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v29n2/2395-8030-tl-29-02-00123.pdf>
- Cavazos, J., Pérez, B. y Mauricio, A. (2014). Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas de Acatzingo, Puebla, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 11, 539-550. <https://www.scielo.org.mx/pdf/asd/v11n4/v11n4a6.pdf>

- Cherlinka, V. (2025). Conservación del suelo: Cómo manejarla e implementarla. *EOS Data Analytics*. <https://eos.com/es/blog/conservacion-del-suelo>
- Cisneros Estrada, O. X. y Saucedo Rojas, H. (2016). *Reúso de aguas residuales en la agricultura*. IMTA / Semarnat. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/riego-drenaje/reuso-aguas-residuales.pdf
- Evaristo, A. (2024, 28 de septiembre). Aguas negras en el campo mexicano. *Milenio*. <https://www.milenio.com/opinion/alejandro-evaristo/pa-no-molestar/aguas-negras-en-el-campo-mexicano>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022a). *Censo Agropecuario (CA) 2022: Resultados definitivos*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ca/2022/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022b). *Usa la estadística y la geografía para descubrir México*. <https://beta.cuentame.inegi.org.mx/descubre/economia/agricultura/>
- Islas, G. (2015). *Biorremediación de suelos agrícolas contaminados con plaguicidas e hidrocarburos* [Tesis de doctorado]. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco, México.
- Kogut, P. (2025). Degradación del suelo: Técnicas para evitar sus efectos. *EOS Data Analytics*. <https://eos.com/es/blog/degradacion-del-suelo/>
- Landsat. (2024). *Imágenes satelitales obtenidas de Google Earth*.
- Mendoza, S., Cervantes, M., Valenzuela, A., Guzmán, T., Orona, C. y Cervantes, T. (2022). Uso potencial de las aguas residuales en la agricultura. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(1), 117-128. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2789>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2014). Base referencial mundial del recurso suelo: Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. *Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos*, (106). <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/dea292cb-370d-46c7-a44d-59a617953c3b/content>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). *Sustainable agriculture: A tool to strengthen food security and nutrition in Latin America and the Caribbean: 2014-2015 highlights*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/201efc50-b231-4e00-b601-6717e43cf5c3/content>
- Quadri, G. (2012). *Defender el medio ambiente*. Trillas.
- Ropero, S. (2020, 12 de febrero). Erosión eólica: Definición, tipos y ejemplos. *Ecología Verde*. <https://www.ecologiaverde.com/erosion-eolica-definicion-tipos-y-ejemplos-2566.html>
- Sánchez Bernal, E. I., Ortega Escobar, H. M., Sandoval Orozco, G. T., Hernández, Viruel, R. A. y Estrada Vázquez, C. (2012). Lavado de sales en suelos aluviales costeros de Oaxaca, México, con aguas residuales municipales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(4), 343-360. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v28n4/v28n4a10.pdf>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Jalisco. (2002). *Programa Rehabilitación y Conservación de Suelos*. <https://www.agricultura>

- gob.mx/sites/default/files/sagarpa/document/2018/11/20/1547/20112018-2001-fa-jal-recs.pdf
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2016). *Tipos de cultivos estacionalidad y cíclicos*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/tipos-de-cultivo-estacionalidad-y-ciclos>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *Productos orgánicos, naturalmente importantes*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/productos-organicos-naturalmente-importantes>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). *Producción de alimentos orgánicos, tendencia exitosa para México*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/produccion-de-alimentos-organicos-tendencia-exitosa-para-mexico>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023, 17 de mayo). *Agricultura, clave para combatir el cambio climático: Villalobos Arámbula* (Comunicado). <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/agricultura-clave-para-combatir-el-cambio-climatico-villalobos-arambula>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). Suelos. En *Informe de la situación del medio ambiente en México* (pp. 153-190). <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap3.html>
- Sistema de Investigación y Posgrado. (2018). *Proyecto de investigación Conservación y uso sustentable de los suelos de México* (Clave SIP 20180582). IPN.
- The Food Tech. (2023). *Agricultura sostenible en México para un mejor futuro alimentario*. <https://thefoodtech.com/seguridad-alimentaria/agricultura-sostenible-en-mexico-para-un-mejor-futuro-alimentario/>
- World Resources Institute. (2025). *Programa de Agricultura Sostenible*. <https://es.wri.org/proyectos/programa-de-agricultura-sostenible>

Sobre los autores

Coordinadoras

María Concepción Martínez Rodríguez

Doctora en Política Pública por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey; Maestra en Administración Pública y Políticas Públicas por la misma institución y Licenciada en Ingeniería Química Industrial por el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Se desempeña como profesora-investigadora del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD) del IPN. Forma parte del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) nivel 1. Su experiencia profesional se ha desarrollado en el sector académico en el CIIEMAD, en el sector público a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) y en el sector privado cuenta con una experiencia de más de 10 años en empresas transnacionales. Sus principales líneas de investigación son las políticas públicas, la gobernanza, la gestión ambiental, el cambio climático, el desarrollo sustentable y los estudios transdisciplinarios. Recientemente ha publicado los artículos “Evaluation of the nutritional quality of agricultural products as a case study: Mexico City markets” (*Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 2022, 10.5154/r.rchsagt.2022.02.04); “Indicadores de carbono en la industria farmacéutica: huella de carbono vs. huella ecológica” (*Fronteiras*, 2022, 10.21664/2238-8869.2022v11i1.p60-75), y “El manejo integral de los residuos sólidos y la evaluación económica de los elementos de pertinencia de los sectores de la población, gubernamental y privada” (*Panorama Económico*, 2022, 10.29201/peipn.v18i37.137).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3094-5411>

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57384672800>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Maria-Martinez-Rodriguez-2/2>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=Knw63xcAAAAJ>

Dulce María Monroy Becerril

Candidata a Doctora en Administración Pública y Maestra en Ciencias en Relaciones Interinstitucionales, con especialidad en Prospectiva, ambos por el Instituto Superior de Estudios Prospectivos. Actualmente es profesora-investigadora de tiempo completo en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación en la Escuela Superior de Comercio y Administración, Unidad Santo Tomás, del Instituto Politécnico Nacional. Ha presentado ponencias en diferentes congresos nacionales e internacionales, así como colaborado en la publicación de varios artículos en revistas arbitradas o indexadas, nacionales e internacionales y capítulos de libros. Asimismo, ha sido directora en proyectos de investigación dentro del Instituto Politécnico Nacional.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0787-5577>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Dulce-Monroy>

Academia: <https://independent.academia.edu/DulceMaríaMonroyBecerril>

Autores

Miguel Alvarado Cardona

Maestro en Ciencias, con especialidad en Ingeniería Ambiental y Licenciado en Ingeniería Civil, ambos por el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Diplomado por la Universidad Iberoamericana. Profesor-investigador del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudio sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD) del IPN. Sus principales líneas de investigación son los pasivos ambientales, las políticas ambientales, la evaluación del impacto ambiental y la sustentabilidad de los suelos. Ha publicado un libro sobre evaluación del impacto ambiental en México, así como varios capítulos de libros. Entre sus publicaciones más recientes están el capítulo “Los pasivos ambientales de la industria petrolera: un estudio preliminar” (Comunicación Científica, 2024, 10.52501/cc.187.08); el artículo “Ecological flow as a water stress control strategy: San Rodrigo river, Coahuila, Mexico” (*Limnological Review*, 2024, 10.3390/limnolrev24040031), y el artículo “Evaluation of the nutritional quality of agricultural products as a case study: Mexico City markets” (*Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 2022, 10.5154/r.rchsa-gt.2022.02.04), todos en coautoría.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9747-260X>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Miguel-Cardona-9>

Correo electrónico: maalvarado@ipn.mx

J. Aurelio Colmenero Robles

Biólogo por el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Se desempeña como Analista en la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN. Es miembro de la Sociedad Botánica de México. Su principal línea de investigación es el conocimiento de la vegetación de México. Recientemente ha publicado los artículos “Aspectos biológicos, geográficos y ecológicos de *Agave durangensis* Gentry (Asparagaceae: Agavoideae): Especie del norte de México” (*Ciencia Latina*, 2025, 10.37811/cl_rcm.v9i3.18776) y “Valoración del impacto ambiental a causa de las actividades ecoturísticas en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala, Morelos, México” (*Ciencia Latina*, 2025, 10.37811/cl_rcm.v9i4.19162), ambos en coautoría.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4959-7963>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Colmenero-Aurelio>

Academia: <https://independent.academia.edu/AurelioColmeneroRobles>

Andrea Patricia Cuevas Gómez

Doctora en Ciencias en Alimentos por el Instituto Politécnico Nacional (IPN) y Licenciada en Ingeniería en Biotecnología por la Universidad Politécnica de Cuauhtlán Izcalli. Se ha desempeñado como docente de asignatura a nivel medio superior y superior, en la Universidad de Estudios Tecnológicos y Avanzados para la Comunidad, además de ser colaboradora en proyectos de investigación en el Laboratorio de Biotecnología de Alimentos del IPN. Ha participado en congresos nacionales e internacionales a partir del año 2021. Sus áreas de investigación son los sistemas nanométricos, los procesos de encapsulación, las técnicas de encapsulamiento y la micro y nanoencapsulación. Recientemente ha publicado el artículo “Encapsulation of *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* using polyvinyl alcohol-based formulations” (*Journal of Bioengineering and Biomedicine Research*, 2025, 10.70632/jbbr.9.3.2025.28-32) y “Squalene-rich amaranth oil Pickering emulsions stabilized by native α -lactalbumin nanoparticles” (*Foods*, 2022, 10.3390/foods11141998), ambos en coautoría.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6010-4720>

Google Académico: https://scholar.google.com/citations?hl=es&user=bO_g9E-sAAAAJ

Diego Domínguez-Solís

Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad por el Instituto Politécnico Nacional (IPN), en el Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD), e Ingeniero Ambiental por la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI) del mismo instituto. Su labor académica se enfoca en el estudio de las soluciones basadas en la naturaleza, los humedales construidos, la gestión sustentable del agua y la economía circular, con un interés particular en los sistemas descentralizados de tratamiento y en los enfoques interdisciplinarios para la sustentabilidad ambiental. Ha colaborado en redes académicas dedicadas a la investigación del agua y la educación ambiental y forma parte del equipo de *SustentaTerra*, podcast de divulgación científica especializado en temas ambientales. Participa como coordinador del libro *Economía circular mexicana, vol. 2* (Comunicación Científica, 2025, 10.52501/cc.365) y es coautor de diversas publicaciones científicas, entre las que destacan “Constructed wetlands as a decentralized treatment option for domestic wastewater: A systematic review (2015-2024)” (*Water*, 2025, 10.3390/w17101451); “Transdisciplina del agua en México: revisión de humedales artificiales” (2025); “Identifying circularity in nature-based solutions: A systematic review” (*Sustainability*, 2025, 10.3390/su17198722), y “El papel de la tecnología para la gestión integral de residuos textiles en México: Una revisión” (*Inter Disciplina*, 2025, 10.22201/ceiich.24485705e.2025.37.87158).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8402-5157>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Diego-Dominguez-Solis>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?user=Ea3jXgkAAAAJ>

Academia: <https://independent.academia.edu/DiegoDominguezSolis>

Rodrigo Florêncio da Silva

Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo por el Instituto Politécnico Nacional, posee estudios de maestría en Educación por la Universidad Interamericana para el Desarrollo y las especializaciones en Uso de las TIC en la Educación, por la Universidad São Paulo y en Dialéctica de la Lengua Portuguesa, por la Universidad Guarulhos, con graduación en Letras Españolas por el Centro Universitario de

Santo André y graduado en Letras, Portuguesa-Inglesa por la Universidad Guarulhos. Recientemente finalizó la carrera de Periodismo por la Universidad Cruzeiro do Sul. Actúa en la ESIME Ticomán del Instituto Politécnico Nacional en los programas de Maestría de Ingeniería Aeronáutica y Maestría Ciencias en Ingeniería Aeronáutica y Espacial. También laboró en la Dirección de Investigación de la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional, hasta octubre de 2021 e imparte clase como profesor invitado en la Maestría de Administración de Empresas para la sustentabilidad en la Escuela Superior de Comercio y Administración (ESCA), Santo Tomás del IPN. Colabora con la Fundación Universitaria Iberoamericana en la dirección de tesis doctorales en Brasil, México y Mozambique. Actualmente es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) nivel 1 y dirige alumnos de maestría y doctorado con temas relacionados con el Medio Ambiente y Desarrollo. Posee proyectos de investigación dentro del IPN en el área de Ciencias Sociales y es autor de libros, de capítulos de libro y de artículos indexados.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9644-7645>

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58286696100>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?user=FB5ntzwAAAAJ>

Correo electrónico: rflorencio@ipn.mx

Cristina Garibay Bagnis

Doctora en Tecnología Avanzada, con especialidad en Alimentos del CICATA, Unidad Legaria, del Instituto Politécnico Nacional; Maestra en Tecnología de Alimentos por la Universidad Estatal de Campinas, São Paulo, Brasil y Licenciada en Química por la Universidad Autónoma de Guadalajara. Líneas de investigación: competitividad y responsabilidad social sostenible, metrología, normalización y evaluación de la conformidad. Recientemente ha publicado, en coautoría, el capítulo “Gestión de recursos socioecológicos y técnicos. Un caso de estudio de los hidrocarburos en México” (Comunicación Científica, 2022, 10.52501/cc.077).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4858-1110>

Academia: <https://ipn.academia.edu/CristinaGaribay>

Raúl Eduardo López Hernández

Doctor en Ciencias en Alimentos por el Instituto Politécnico Nacional y Licenciado en Química en Alimentos por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Sus áreas de investigación son la elaboración y caracterización reológica, la termodinámica y cinética de sistemas dispersos como emulsiones y suspensiones, así como la obtención y caracterización morfológica de nanopartículas de almidón. En la actualidad, es miembro del SNI (nivel candidato) y se encuentra realizando una estancia posdoctoral por la SECITI en la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, donde continúa expandiendo su línea de investigación en sistemas dispersos. Recientemente ha publicado los capítulos “Starch nanocrystals as Pickering emulsion stabilizers” (CRC, 2024) y “Processing of protein microparticles and their application as lipid replacer for low-calorie foods” (CRC, 2024), ambos en coautoría.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9738-7026>

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202385913>

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Raul-Lopez-Hernandez?e-v=hdr_xprf

Ángel de Jesús Mc Namara Valdés

Doctorando en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad por el Instituto Politécnico Nacional; Maestro en Administración de Empresas para la Sustentabilidad por la Escuela Superior de Comercio y Administración (ESCA), Unidad Santo Tomás, del IPN, e Ingeniero en Control y Automatización por la ESIME Zacatenco del IPN. Es docente en la UPIEM también del IPN, y sus principales líneas de investigación son el transporte informal de última milla, el impacto socioambiental del transporte y la movilidad urbana. Su publicación más reciente se titula “The ‘vochotaxis’ of Cuauhtémoc in Mexico City, Mexico: Informal last-mile transportation in peripheral areas” (*Revista de Gestão*, 2025, 10.24857/rgsa.v19n2-039).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8640-9741>

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58286515400>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Angel-De-Jesus-Valdes>

Google Académico: https://scholar.google.com.mx/citations?user=cG8Br_EAAAAJ

Correo electrónico: amcnamarav@ipn.mx

Ilse Monroy Rodríguez

Doctora en Ciencias de los Alimentos por el Instituto Politécnico Nacional (IPN) y Licenciada en Química en Alimentos por la Universidad Autónoma del Estado

de Hidalgo (UAEH). Actualmente se desempeña como profesora-investigadora de tiempo completo adscrita a la Licenciatura en Gastronomía del Instituto de Ciencias Económico Administrativas de la UAEH. Cuenta con el nombramiento de investigadora-candidata en el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) del SECIHTI (2023-2026). Forma parte de redes académicas relacionadas con las ciencias y tecnología de los alimentos y colabora en proyectos que promueven la innovación y sostenibilidad alimentaria. Su principal línea de investigación se centra en la evaluación del efecto del procesamiento sobre las propiedades tecnofuncionales y estructurales de proteínas de origen vegetal. Entre sus publicaciones recientes destacan el capítulo “Processing of protein microparticles and their application as lipid replacer in low-calorie foods” (CRC, 2024), y el artículo “Structural and functional modification of proteins by microfluidization: Principles and applications in food technology and engineering (ACS Food Science & Technology, 2025, 10.1021/acsfoodscitech.5c00427), los cuales reflejan su aportación al estudio de los sistemas proteicos vegetales y su aplicación en el desarrollo de alimentos sustentables.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5042-4966>

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57219558216>

Correo electrónico: ilse.monroy.r@gmail.com

Christian Muñoz Sánchez

Doctor en Ciencias Administrativas por la Escuela Superior de Comercio y Administración (ESCA), Unidad Santo Tomás, del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Graduado con distinción *cum laude* y Doctor en Ciencias Sociales (Economía y Gestión de la Innovación) por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. Obtuvo la Maestría en Ciencias en Administración y Licenciatura en Administración Industrial por la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas del IPN. Actualmente se desempeña como Coordinador de la Maestría en Ciencias en Administración en la ESCA. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) del SECIHTI, nivel candidato. Sus líneas de investigación se centran en estudios de innovación y sustentabilidad, capacidades tecnológicas, sistemas tecnológicos complejos, administración de operaciones, excelencia operacional y transiciones sustentables. Es miembro activo de la red académica Industrial Engineering and Operations Management Society International y de la Red de Medio Ambiente (REMA) del IPN.

Publicaciones recientes: capítulos de *Traducción de datos científicos a incidencia socioambiental en México* (Comunicación Científica, 2024, 10.52501/cc.187) y el artículo “Análisis comparativo de la movilidad sustentable en Ciudad de México y Santiago de Chile” (*Letras Verdes*, 2023, 10.17141/letrasverdes.33.2023.5594).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8692-4252>

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57209292143>

ResearchGate: https://www.researchgate.net/profile/Christian_Munoz11

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?user=UHVbe-kAAAAJyhl=es>

Academia: <https://independent.academia.edu/CHRISTIANMuñozSánchez>

Correo electrónico: cmunozs@ipn.mx

Obed Pardo Santos

Doctorando en Administración y Políticas Públicas, Maestro en Administración y Políticas Públicas por la Escuela Superior de Comercio y Administración del Instituto Politécnico Nacional (ESCA-IPN) y Licenciado en Derecho. Ha desarrollado una sólida trayectoria en el ámbito académico y de investigación, donde destaca la coordinación de un proyecto nacional de investigación e incidencia (PRONAI) perteneciente a los Programas Nacionales Estratégicos de Soberanía Alimentaria del entonces Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), hoy Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI). Actualmente, se desempeña como profesor-investigador en el Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD-IPN), donde realiza investigaciones sobre política públicas y movilidad urbana sostenible. Es miembro del Colegio de Profesores del CIEMAD, miembro de la Red de Medio Ambiente del IPN y del Comité Científico Académico de la Red Internacional de Investigadores sobre Problemas Sociourbanos, Regionales y Ambientales (RIIPSURA).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4341-9368>

Héctor Guadalupe Ramírez Escamilla

Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad e Ingeniero Ambiental, ambos por el Instituto Politécnico Nacional. Fue practicante en la Cooperación Técnica Alemana (GIZ) en México, donde colaboró en proyectos enfocados en la gestión integral de residuos y su vinculación con la economía circular.

Su trayectoria se ha centrado en la gestión de residuos sólidos urbanos y textiles, con un enfoque transversal en sustentabilidad, economía circular e inclusión social. Ha participado en investigaciones sobre recolección inteligente de residuos textiles y el desarrollo de planes de manejo sustentable. Ha sido ponente en congresos internacionales organizados por instituciones como la Universidad de Buenos Aires y la Universidad Autónoma de Madrid, presentando temas como “gobernanza ambiental en residuos sólidos urbanos: Políticas, manejo y relevancia” y “Abordando la desigualdad a través de la gestión de residuos sólidos urbanos”, lo que refleja su compromiso con la divulgación científica y el diálogo interdisciplinario ante los retos ambientales actuales. Cuenta con publicaciones en revistas científicas como MDPI, destacando los artículos: “Advancing toward sustainability: A systematic review of circular economy strategies in the textile industry” (*Recycling*, 2024, 10.3390/recycling9050095), e “Identifying circularity in nature-based solutions: A systematic review” (*Sustainability*, 2025, 10.3390/su17198722)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9440-4644>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Hector-Ramirez-Escamilla>

Google Académico: <https://scholar.google.com/citations?user=fyJvKSQAAAAJ>

Academia: <https://ipn.academia.edu/HectorRamirezEscamilla>

Andrea Alejandra Rendón Peña

Maestra en Ciencias Fisicomatemáticas por el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Directora de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Energía y Movilidad (UPIEM) del IPN.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8326-8341>

Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel

Doctor en Ciencias Administrativas, Maestro en Administración y Licenciado en Administración Industrial por el Instituto Politécnico Nacional. Profesor de la Escuela Superior de Comercio y Administración, Unidad Santo Tomás (ESCA-ST), del Instituto Politécnico Nacional. Miembro del SNII (nivel 1) e integrante de la Red de Investigadores Sociales sobre el Agua (RISSA). Líneas de investigación: gestión del agua, tratamiento de aguas residuales, sostenibilidad, gestión de recursos. Recientemente ha publicado los artículos “Sustainable water resource management to achieve net-zero carbon in the water industry: A systematic review of the literature” (*Water*, 2025, 10.3390/

w17142136), y “Advanced oxidation process in the sustainable treatment of refractory wastewater: A systematic literature review” (*Sustainability*, 2025, 10.3390/su17083439).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-4696>

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197809938>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Jorge-Alejandro-Silva-Rodríguez-De-San-Miguel>

Google Académico: <https://scholar.google.com.mx/citations?user=9N6rHcgAAAAJ>

Correo electrónico: jasilva@ipn.mx

José Irving Valdez Miranda

Doctor en Ciencias en Alimentos por el Instituto Politécnico Nacional (IPN), donde realizó su tesis sobre el efecto del campo electrostático de alto voltaje en la calidad postcosecha del plátano. Obtuvo el título de Ingeniero en Procesos Alimentarios por la Universidad Tecnológica de la Costa Grande de Guerrero. Actualmente, se desempeña como docente en la Universidad Insurgentes, donde imparte materias relacionadas con bioquímica, microbiología, nutrición e higiene en alimentos. Su trabajo académico se centra en las líneas de investigación de tecnologías no térmicas para la conservación de alimentos, análisis digital de imágenes aplicado a la maduración postcosecha y caracterización enzimática y estructural de frutas mediante espectroscopía infrarroja. Cuenta con formación complementaria realizada durante múltiples estancias de investigación en el Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA-IPN), y ha sido reconocido con la distinción de *cum laude* y el Premio al Mejor Desempeño Académico 2024 por su trayectoria doctoral. Aunque aún no cuenta con membresía formal en el Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) del SECyTI, su producción científica lo posiciona como candidato en etapas iniciales de incorporación. Fue revisor científico invitado para la revista internacional *Food Engineering Reviews* (Springer Nature, 2025). Recientemente ha publicado los artículos “Health benefits of high voltage electrostatic field processing of fruits and vegetables” (*Plant Foods for Human Nutrition*, 2024, 10.1007/s11130-024-01190-x), y “Effect of high-voltage electrostatic field treatments on bananas (*Musa paradisiaca* var. *sapientum*) on their postharvest quality, enzymatic activity and morphological changes” (*Food and Bioproducts Processing*, 2024, 10.1016/j.fbp.2024.05.007).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6703-0568>

Scopus: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59131226200>

Google Académico: <https://scholar.google.com.mx/citations?user=R7h6o98AAAAJ>

ResearchGate: <https://www.researchgate.net/profile/Jose-Valdez-Miranda>

Factores clave que influyen en la política industrial verde de México, de María Concepción Martínez Rodríguez y Dulce María Monroy Becerril (coordinadoras), publicado por Ediciones Comunicación Científica, S. A. de C. V., se terminó de imprimir en julio de 2026, en Litográfica Ingramex, S. A. de C. V., Centeno 162-1, Granjas Esmeralda, 09810, Ciudad de México. El tiraje fue de 500 ejemplares impresos y en versión digital para acceso abierto en los formatos PDF, EPUB y HTML. El cuidado de la edición estuvo a cargo de Sebastián Gómez Zaldívar.

En la presente obra proponemos la integración de algunos de los factores clave que influyen en la política industrial verde en México, con la intención de identificar el pasado, presente y futuro para nuestro país en la materia, porque consideramos que debemos estar preparados para enfrentar esta nueva ola de lineamientos económicos que supuestamente contemplan lo ambiental en las cadenas de producción, y México no puede llegar tarde. Sin embargo, esta preparación no puede estar basada en falsas acciones, queremos que nuestro país se integre preparado con todos los elementos que conlleva la producción verde, mediante políticas bien diseñadas y pensadas verdaderamente a largo plazo, unas políticas sustentables, unas políticas industriales sustentables, con todo lo que implica la palabra *sustentable* y nos solo verde, como se ha manejado en el mundo en general. Es así como hemos diseñado esta obra para abonar al conocimiento en la materia y con ello prepararnos para seguir participando de una economía global partiendo del ámbito local, para no ser excluidos de estos nuevos lineamientos para la producción de bienes y servicios.



María Concepción Martínez Rodríguez es Doctora en Política Pública y profesora-investigadora en el CIIEMAD del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Perteneció al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (nivel I), a la Red de Medio Ambiente del IPN y a la Red de Economía Circular de la UNAM. Además, ha sido Subdirectora de Movimientos Transfronterizos y Asuntos Internacionales de la Semarnat.



Dulce María Monroy Becerril es Doctora en Administración Pública y directora y profesora titular C de la Escuela Superior de Comercio y Administración, unidad Santo Tomás, del IPN. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (nivel C) y de la Red de Medio Ambiente (REMA) del IPN. Sus líneas de investigación se centran en la competitividad y la responsabilidad social sostenible, así como en las estrategias organizacionales.



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



COMUNICACIÓN
CIENTÍFICA
PUBLICACIONES
ARBITRADAS

comunicacion-cientifica.com



Dimensions

RENIECYT

Registro Nacional de Instituciones
y Empresas Científicas y Tecnológicas

2000922



Google
Scholar

Dialnet



[DOI.ORG/10.52501/CC.370](https://doi.org/10.52501/CC.370)

ISBN: 978-968-9738-32-9



9 789689 738329