

Educación ambiental y tecnologías sustentables

Propuestas y prácticas para
un futuro socialmente responsable

Coordinadores

Mario Morales Máximo

Luis Bernardo López



Serie
Ciencias Exactas
e Ingenierías

UIM

Educación ambiental
y tecnologías sustentables
Propuestas y prácticas para
un futuro socialmente responsable

*Educación ambiental y tecnologías sustentables.
Propuestas y prácticas para un futuro socialmente responsable*

Primera Edición
Pátzcuaro, Michoacán, México.
Enero de 2025

Área de conocimiento:
Ciencias Exactas e Ingenierías

Coordinadores:
Mario Morales Máximo
Luis Bernardo López Sosa

Diseño y cuidado editorial:
V. Eduardo Rodríguez

Gestión editorial del ISBN:
Mario Morales Máximo

DR ® Universidad Intercultural Indígena de Michoacán
Publicación financiada con recursos del Programa para
el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) 2024.



“Este programa es público, ajeno a cualquier partido político.
Queda prohibido el uso para fines distintos a los establecidos en el programa”.

ISBN: 978-607-9386-27-6

Esta obra refleja la opinión, análisis, métodos y resultados
del autor y no necesariamente los de la UIIM. Por lo que el
crédito se asume al autor.



Queda prohibida la reproducción parcial o total del contenido
de la presente obra sin contar previamente con la autorización
expresa y por escrito del titular en términos de la ley federal
de derechos de autor.



Educación ambiental y tecnologías sustentables

Propuestas y prácticas para un futuro socialmente responsable

Mario Morales Máximo y Luis Bernardo López Sosa
Coordinadores



**Universidad
Intercultural
Indígena
de Michoacán**



Serie
**Ciencias Exactas
e Ingenierías**

Material de consulta y de libre acceso de la
Universidad Intercultural indígena de Michoacán

DIRECTORIO
Universidad Intercultural Indígena de Michoacán

Rectora
Mtra. Jennifer Martínez Murillo

Director académico
Dr. Luis Bernardo López Sosa

Director de planeación programación y presupuesto:
Mtro. David Daniel Romero Robles

Delegado administrativo
Lic. Juan Carlos Rodríguez Méndez

Jefe del departamento de difusión, publicaciones y educación continua
C. Cuahutemoc Gerardo Rodríguez

Cordinador de apoyos y servicios académicos y
editor en jefe del área de publicaciones de la UIIM
Dr. Mario Morales Máximo

Proceso de revisión por pares

Esta obra se sometió al sistema de dictaminación a “doble ciego” por especialistas en la materia, a través del comité editorial institucional de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Los resultados de los dictámenes fueron emitidos por los evaluadores de forma positiva. De igual forma las evaluaciones positivas se emitieron a los autores a través del comité editorial. En la presente publicación el Consejo Editorial designó al siguiente grupo de evaluadores:

Dr. Ricardo González Carabes,
de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán

Dr. David Espinosa Gómez,
de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Dr. José Guadalupe Rutiaga Quiñones,
de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Dr. Miguel Moctezuma Sánchez,
de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán

Dr. Arturo Aguilera Mandujano,
de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán

CDR. Luis Fernando Pintor Ibarra,
de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Dr. Seraffín Colín Urieta,
de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán

Dr. Saúl Leonardo Hernández Trujillo,
de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán

Dr. Pablo Sebastian Felipe,
de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán

ÍNDICE

Prólogo en español	11
Prologue in english	13
Prólogo en purépecha	15

Bloque 1

Gestión ambiental y del territorio

- Sistemas de información geográfica como herramienta de la educación ambiental en la conservación del territorio 19
- Servicios ecosistémicos para la educación ambiental intercultural 39
- Una comunidad michoacana ante “el año del hambre”. Santa Fe del Río, 1785-1786. Sus efectos y el medio ambiente 67

Bloque 2

Gestión del agua

- Calidad de agua en comunidades de la Meseta Purépecha 91
- Abastecimiento de agua en zonas rurales y ecotecnologías relacionadas 137
- Aplicación de tecnología sostenible para mejorar la calidad de agua tratada en PTAR 153

Bloque 3
Gestión de residuos y bioenergía

- Bioenergía y desarrollo comunitario: proyecto local para la autosuficiencia energética como estrategia en materia de educación ambiental 201
- Estrategias para la gestión de residuos sólidos urbanos en las Comunidades Purépechas 215

PRÓLOGO

La educación ambiental y las tecnologías sustentables son pilares fundamentales para construir un futuro más justo, equitativo y responsable. En un contexto donde los desafíos ambientales son cada vez más apremiantes, este libro, titulado *Educación ambiental y tecnologías sustentables: propuestas y prácticas para un futuro socialmente responsable*, busca aportar reflexiones, estrategias y prácticas que sirvan como guía e inspiración tanto para comunidades rurales e indígenas como para académicos y profesionales interesados en la transición hacia un modelo de desarrollo sostenible.

11

La obra está organizada en torno a temáticas centrales que reflejan los aspectos más relevantes de la sostenibilidad ambiental y social. En el capítulo de **Gestión ambiental y del territorio** se analiza la importancia de planificar y manejar los recursos naturales con un enfoque integral, respetando las dinámicas ecosistémicas y las necesidades socioculturales de las comunidades. Este enfoque permite entender el territorio no solo como un espacio físico, sino también como un lugar de interacción entre la naturaleza y las personas.

En **Gestión del agua** se abordan estrategias para el uso eficiente, conservación y tratamiento de este recurso vital. Con una visión que combina conocimientos tradicionales y tecnológicos, se proponen alternativas que aseguren la disponibilidad y calidad del agua para las generaciones presentes y futuras, especialmente en contextos vulnerables.

El tema de **Gestión de residuos y bioenergía** nos invita a replantear nuestras prácticas de consumo y generación de energía. Este apartado se centra en cómo convertir los desechos en recursos aprovechables mediante tecnologías innovadoras, promoviendo la generación de energías alternativas que no solo mitigan el impacto ambiental, sino que también fortalecen la autonomía energética de las comunidades.

Este libro no solo pretende ser una fuente de consulta digital y de acceso público en bibliotecas comunitarias, sino también un material diseñado para estar al alcance de poblaciones rurales e indígenas interesadas en estas temáticas. Sin embargo, su alcance no es limitado, ya que también se dirige a la comunidad académica y a todas aquellas personas comprometidas con la búsqueda de alternativas que promuevan una transición hacia un sistema más democrático, justo y sustentable.

Es por ello que se invita a los lectores a explorar los diversos capítulos que conforman esta obra, escritos por especialistas en redacción y conocimiento técnico provenientes de distintas universidades y regiones de México. Cada autor ha contribuido desde su experiencia y perspectiva, enriqueciendo este material que se ciñe a los principios de sustentabilidad y cuidado del medio ambiente.

Educación ambiental y tecnologías sustentables: propuestas y prácticas para un futuro socialmente responsable es más que un libro; es una herramienta para la reflexión y la acción. Esperamos que inspire a los lectores a ser agentes de cambio en la construcción de un futuro que respete la vida en todas sus formas y fomente el bienestar colectivo.

Mario Morales Máximo

PROLOGUE

Environmental education and sustainable technologies are fundamental pillars for building a more just, equitable and responsible future. In a context where environmental challenges are increasingly pressing, this book, entitled *Environmental Education and Sustainable Technologies: Proposals and Practices for a Socially Responsible Future*, seeks to provide reflections, strategies and practices that serve as a guide and inspiration for both rural and indigenous communities as well as for academics and professionals interested in the transition towards a sustainable development model.

13

The work is organized around central themes that reflect the most relevant aspects of environmental and social sustainability. In the chapter on Environmental and Territorial Management, the importance of planning and managing natural resources with a comprehensive approach is analyzed, respecting ecosystem dynamics and the sociocultural needs of communities. This approach allows us to understand the territory not only as a physical space, but also as a place of interaction between nature and people.

Water Management addresses strategies for the efficient use, conservation and treatment of this vital resource. With a vision that combines traditional and technological knowledge, alternatives are proposed to ensure the availability and quality of water for present and future generations, especially in vulnerable contexts.

The topic of Waste Management and Bioenergy invites us to rethink our energy consumption and generation practices. This section focuses on how to convert waste into usable resources through innovative technologies, promoting the generation of alternative energies that not only mitigate the environmental impact, but also strengthen the energy autonomy of communities.

This book is not only intended to be a digital and publicly accessible source of reference in community libraries, but also a material designed to be accessible to rural and indigenous populations interested in these topics. However, its scope is not limited, as it is also addressed to the academic community and to all those people committed to the search for alternatives that promote a transition towards a more democratic, fair and sustainable system.

Readers are therefore invited to explore the various chapters that make up this work, written by specialists in writing and technical knowledge from different universities and regions of Mexico. Each author has contributed from his or her experience and perspective, enriching this material that adheres to the principles of sustainability and care for the environment.

Environmental Education and Sustainable Technologies: Proposals and Practices for a Socially Responsible Future is more than a book; it is a tool for reflection and action. We hope that it inspires readers to be agents of change in building a future that respects life in all its forms and fosters collective well-being.

Mario Morales Máximo

WENATARAKWA

Jorhenperakwa sési irekwa nitámakurikwa ka úratarakuecha sési marhotatarakuecha jistestisi jupitsitarakuecha enk'así marowak'a jininanani isi sési irekani, ka mark'uensi, mark'u marhotani ampe ka kaxumpentani. Jánhaskurikwa irekwarhu nitamakua enk'a yamu ampe tsunhapik'a sántaru k'uanini jaki janhanskantani. I takukukata arhikata sési irekwa nitamakurhikwa ka úratarakuecha sési marhotarakuecha: eratsikuecha ka úkuecha enkasi erak'a sési nitamakurikwani, jankurhintasiati marhotspini, sési eratsitpintani ka jirinhantani úkuechani enkasi marhowak'a xanhatani ka eratsitpini sési irekwani iretecharhu ka yamu jorhenta p'itichani.

Takukukata mantani úkuecharhu eratsikata jarhasti wantantani imani ampe enk'a santeru jukaparak'a sési irekueri. Ma arhukukuarhu jánhas-kantasinti na úni ka sési xanhatani yamu kuerakatani enk'a janhanhariek'a yamu tsikikwani ampe ka yamu irerakwani ampe iretecherini. I jasi eratsikwa marhosinti jánhanskantani yamu echerini enk'a irenhak'a ixu kat'u mark'u yamu kuerakatani ka kuiripuri irekwani.

Itsi kurapikueri ampe, eratsinhantasinti nána sési úrani ka marhotani, patsani ka ampanharhintantani. Kúntapani janhaskakwani enk'a jupok'a ka úratarakuechani enkasi marhowak'a eska ménkisi jawak'a itsi, ménkisi ampanharirini jawak'a, enkasi úak'a marhotani jarhani yamu kuiripucha, yasi anapucha ka imecha enkasi antapinok'a, ka yamu imecha enkasi memichani no ampe jatsikurhik'a.

Eratsinkwa k'aratsikueri kurápikwa ka úrakwa yamu jasi ampe marhotakueri p'imarisintitsini eratsintani juchari úrakwa erákutarakwa ka niniratarakueri ampe. I arhukukatarhu janhanskanhantasinti nána marhotani yamu k'aratsitakatani, úrapani jinpanhi úratarakuechani enk'así yasi xaratanhani jak'a, p'akapani úratarakuechani enkasi jintek'a niniratarakwa ka erakutarakwa ampe, enkasi no nosi úkok'a juchari irekwani,

ka winhaperantak'a juchari sési irekwani ka juchari juramukurikwani iretecherini.

Ini takukukatarhu nok'u jankurhinhantasinti mark'u janhaskakueri ampe, ka erokasinti eska yamu kuiripu úaka arhintani takukukatarhu jatakarhu. Jánkurintasintit'u eska marhokowak'a yamu iretechani no utusi wantarichani ka yamu kuiripuni enk'a tsitik'a eratsintani i jasi eratsikwani. Mark'ut'u mintakata jarasti eska marhokowak'a jánhaskatichani, jorhenta p'itichani ka yamu kuiripuni enk'a jánkurintani jak'a marhotani jimpanhi úratarakuechani ka xanhatani jak'a mótakukwani ka esk'a yamintuchani sési marhokowak'a ka isi únsi markuntani ka menkisi jánkurhini jatsikurhinsi ampe.

16

Isi jimpo p'imarhiexakasi yamu arhinstichani esk'asi arhientawak'a yamu arhukukatechani ini takukukatarhu anapuchani, enk'asi karantak'a wani janhaskaticha ka mititicha interi ampe enk'asi yapuru isi anapuk'a ka anchikurhikasí jorhenperakuecharhu ixu kéri echerio. Yamu kararicha jánkurhintastisi k'upini i jánhaskakueri ampe, káneransparini eratsikwa sési irekwa nitamakurhikueri ampe ka patsakueri ampe yamu kuerakatek'a.

Jorhenperakwa sési irekwa nitamakurikwa ka úratarakuecha sési marhotatarakuecha no jintestik'u ma takukukata, jintestit'u ma úratarakwa enk'a marhowak'a sési eratsintani, sési úkueri ampe. Erokarparhini eska i karanskata yamintuchani marhokowak'a, i jánkurhita jintesti motakuticheri enk'asi waxastak'a jimpanhi úratarakwa ampe ka sési irekwa yamint'ucheri.

Mario Morales Máximo

BLOQUE 1
GESTIÓN AMBIENTAL
Y DEL TERRITORIO

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA COMO HERRAMIENTA DE LA EDUCACIÓN AMBIENTAL EN LA CONSERVACIÓN DEL TERRITORIO

Cecilia Irene Villaseñor-Reyes

Maestría en educación ambiental de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Carretera Pátzcuaro-Huecorio Km 3, Pátzcuaro, Michoacán, C.P. 61614. E-mail: cecilia.villasenor@uiim.edu.mx

Resumen

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han consolidado como herramientas fundamentales para el análisis y gestión de datos geoespaciales, facilitando la toma de decisiones en la administración de recursos. Aunque inicialmente fueron diseñados para la planificación y gestión de cierto tipo de recursos naturales, su aplicación se ha extendido a numerosos campos, incluyendo la educación ambiental. Este artículo tiene como objetivo explorar, desde una perspectiva divulgativa, cómo los SIG pueden facilitar la integración de conocimientos multidisciplinarios, ofreciendo a estudiantes y al público en general la posibilidad de analizar las interacciones complejas entre factores naturales y humanos. La primera parte del texto ofrece una introducción a los conceptos fundamentales de los SIG, en donde se aborda su definición, tipos de datos que maneja y el modelo de capas. La segunda parte discute las ventajas y los desafíos que los SIG presentan en el contexto de la educación ambiental, ilustrando su relevancia en este ámbito a través de temas relacionados con el patrimonio natural y los riesgos y desastres. De esta forma, se espera que los lectores logren una comprensión sobre las capacidades de los SIG y su potencial para promover la alfabetización ambiental. Es decir, el desarrollo de habilidades y actitudes que permitan a la población entender los sistemas ambientales, identificar problemas y participar activamente en soluciones tanto a nivel local como global.

Palabras clave: Sistemas de Información Geográfica, datos geográficos, pensamiento espacial, sustentabilidad, alfabetización ambiental.

Introducción

La necesidad de contar con herramientas visuales que nos permitan comprender, inventariar y ubicarnos en nuestro entorno ha sido una característica inherente del ser humano a lo largo de la historia (Harley, 1987). Esta capacidad no solo ha sido esencial para la supervivencia, sino también para planificar el desarrollo de las sociedades y optimizar el uso de los recursos que nos rodean. La respuesta a esta necesidad fue el desarrollo de los mapas, que se pueden definir como medios diseñados para comunicar información espacial generalizada y las correlaciones entre diferentes elementos geográficos (Lapaine et al., 2021). Durante gran parte de la historia, los mapas se producían de manera análoga, pero con el advenimiento de las ciencias computacionales modernas, es decir, las computadoras de uso comercial y los lenguajes de programación, a partir de la década de 1960, los procesos cartográficos comenzaron a migrar hacia lo digital. Este cambio dio lugar a la creación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

En sus primeras fases, los SIG fueron concebidos como herramientas para manejar y analizar bases de datos geográficos, permitiendo gestionar grandes volúmenes de información y resolver problemas espaciales complejos en constante cambio a través del tiempo (Tomlinson, 1988). Precisamente, el primer SIG, desarrollado por Roger Tomlinson en los años sesenta, tenía como objetivo principal crear un inventario de los recursos naturales de Canadá para facilitar la elaboración de un programa para la planificación y gestión del uso del suelo de ese país. Este sistema innovador no solo permitió la administración eficiente de datos geográficos, sino que sentó las bases para el desarrollo posterior de los SIG, que se han consolidado como herramientas fundamentales en la gestión de recursos y la toma de decisiones espaciales.

Con el tiempo, el uso de los SIG ha trascendido su aplicación inicial en la gestión de recursos naturales, extendiéndose a otros campos, incluyendo la educación ambiental. Los SIG ofrecen una manera innovadora y eficiente de integrar conocimientos provenientes de distintas disciplinas, permitiendo a estudiantes y profesionales analizar y visualizar interacciones complejas entre factores naturales y humanos. En este contexto,

resulta pertinente recordar el espíritu que acompañó la transición de la cartografía analógica a la digital y el nacimiento de los SIG. En palabras de Tomlinson (1988) “is really a part of a much broader theme; of humans making, or at least starting to make, a huge step forward in their ability to describe, explain and perhaps make better decisions about managing the world they live in” [es en realidad parte de un tema mucho más amplio: el de los seres humanos que dan, o al menos empiezan a dar, un gran paso adelante en su capacidad para describir, explicar y quizás tomar mejores decisiones sobre la gestión del mundo en que viven] (p. 249). Esta afirmación pone de relieve el potencial de los SIG como herramientas no solamente técnicas, sino también educativas y de gestión.

En el caso de la educación ambiental, una de sus partes fundamentales es la de integrar información de distintos campos de las ciencias sociales, naturales y exactas, con el objetivo de diseminar y aplicar ese conocimiento para lograr una alfabetización medioambiental (Carter & Simmons, 2010). Este objetivo no solamente debe ser entendido como la diseminación de conocimiento, sino también como el promotor del desarrollo de habilidades y actitudes en individuos y grupos para entender los sistemas ambientales, identificar problemas y participar activamente en la prevención o la búsqueda de soluciones a nivel local y global (UNESCO-UNEP, 1976).

Con esto en mente, es posible ver como los SIG pueden ser una herramienta natural en la significativa labor de la educación ambiental por cumplir su objetivo. El entendimiento básico de qué es lo que nos rodea, cómo y porqué ha cambiado durante el tiempo y, sobre todo, cómo podemos gestionar lo que tenemos para propiciar su conservación y el desarrollo sostenible, son temas en los cuales los SIG pueden compenetrarse con la educación ambiental.

Este capítulo se divide en dos apartados principales. El primero tiene como finalidad el presentar una introducción básica de los SIG desde un punto de vista divulgativo, en donde se abordan temas fundamentales como su definición, tipos de datos que manejan y el modelo de capas. Por otro lado, en el segundo apartado se busca ilustrar cómo los SIG pueden promover la educación ambiental y facilitar la toma de decisiones informadas en temáticas como la conservación del patrimonio natural y los peligros. Además, se hace una breve discusión acerca de algunas de las ventajas, desventajas y desafíos en este tema.

Generalidades sobre los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Al retomar la descripción inicial de los SIG, en la sección introductoria de este texto, podemos darnos cuenta que se abordan distintas variables. Por ejemplo, se habla de herramientas, datos geográficos, bases de datos y solución de problemas. Con estas variables iniciales podemos intuir que los SIG requieren más que un software especializado para funcionar. Es por eso que se considera que un SIG es un conjunto de 5 componentes esenciales, que se describen a continuación (Figura 1):

Datos

22

Los datos que se manejan dentro de un SIG son esencialmente geográficos, constituidos de dos elementos: el espacial y el temático. El primero tiene que ver con la ubicación de cada objeto o evento sobre la superficie terrestre a través de un sistema de referencia (i.e. coordenadas) y las relaciones espaciales que hay entre ellos (i.e. topología). Por otro lado, el elemento temático tiene que ver con las características no-espaciales de esos objetos y generalmente se almacenan en tablas de atributos. Estos dos elementos se han ejemplificado en la Figura 2, en donde podemos observar un plano cartesiano sobre el que se han puesto tres objetos familiares de nuestra cotidianidad: un árbol, un carro y una casa (Figura 2a). Cada uno de esos objetos tiene una ubicación dentro de ese plano (elemento espacial), por lo tanto podemos convertirlos en datos geográficos obteniendo sus coordenadas tal y como se describe en la segunda fila de la tabla (Figura 2b). Además, esos objetos tienen características propias y variadas que podemos almacenar (elemento temático), según sea nuestro objetivo.



Figura 1. Componentes de un SIG. Elaboración propia.

Software

Por software o programa nos referimos a ese conjunto de herramientas o instrucciones creadas específicamente para el manejo y tratamiento de los datos geográficos en un ambiente computacional. El software no solo facilita la manipulación de los datos, sino que también permite realizar análisis complejos como la modelización espacial, la simulación de escenarios, la generación de mapas temáticos, entre otros. En la actualidad existen una gran variedad de SIG, tanto comerciales como libres, con aplicaciones diversas.

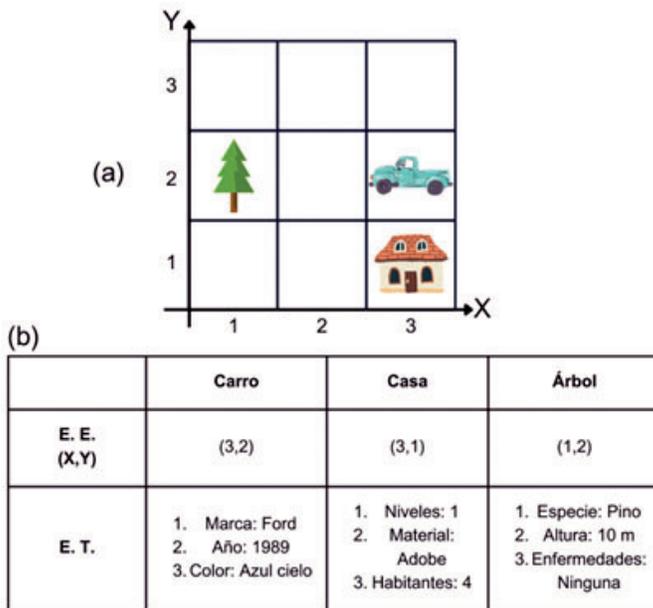


Figura 2. Ejemplificación de los (a) datos geográficos y sus (b) elementos espaciales (E.E.) y temáticos (E.T.). Elaboración propia.

Hardware

El hardware se refiere a la parte física del sistema computacional. Aunque los elementos obvios del hardware incluyen las pantallas, los teclados, los ratones y el gabinete (o cuerpo de la laptop, de ser el caso), existen otros componentes críticos como los procesadores, la memoria RAM y los sistemas de almacenamiento (discos duros y servidores). Sin estos últimos sería imposible, en primer instancia, almacenar la gran cantidad de datos geográficos que se utilizan y se generan en los procesamientos dentro de un SIG. Además, los sistemas de almacenamiento en la nube están ganando popularidad en la actualidad, lo que facilita el acceso y la colaboración en proyectos de SIG a escala global.

Metodologías

Las metodologías dentro de un SIG hacen referencia a los procedimientos y lineamientos que se siguen para realizar análisis y generar resultados. Cada usuario o institución puede desarrollar sus propias me-

todologías en función de los objetivos específicos de cada proyecto. Las metodologías incluyen la forma en que se recolectan los datos, cómo se procesan y analizan, y cómo se interpretan los resultados.

Usuarios

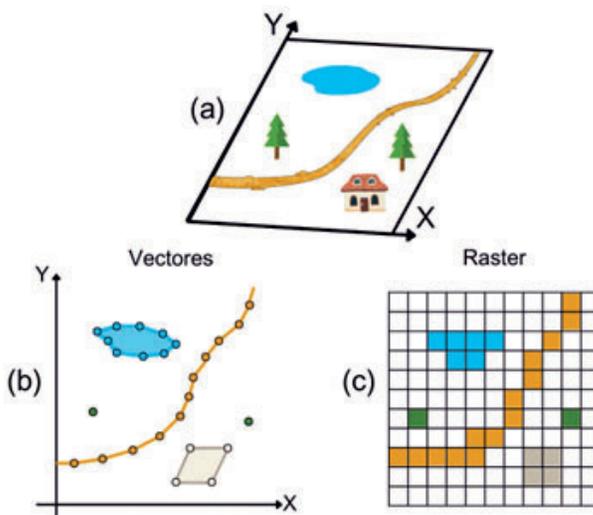
Los usuarios de un SIG pueden dividirse en dos grupos principales: usuarios operativos y usuarios finales. Los usuarios operativos son aquellos que trabajan directamente con el sistema, manipulando los datos geográficos y realizando los análisis. Generalmente, son personas con formación técnica que entienden los principios de los SIG y pueden manejar el software de manera eficaz. Los usuarios finales, por otro lado, son aquellos que utilizan los resultados generados por los usuarios operativos. Estos pueden ser tomadores de decisiones, como urbanistas, científicos, funcionarios gubernamentales, educadores o incluso ciudadanos comunes interesados en la información espacial para resolver problemas cotidianos.

Al comprender los cinco componentes que conforman todo SIG, es posible entonces proponer una definición de los mismos: un SIG es un sistema computacional para la captura, almacenamiento, consulta, análisis y visualización de datos geográficos (Reddy, 2018).

25

Representación de datos geográficos

Cuando observamos un mapa impreso es fácil darnos cuenta que lo que vemos es una representación de una parte pequeña o amplia de la Tierra a través de distintas formas geométricas, colores e íconos. A esto se le conoce como una abstracción o simplificación de la realidad. Esto es necesario debido a la complejidad de los distintos sistemas (naturales y antrópicos) coexistiendo en nuestro entorno. En el caso de los SIG, esta simplificación de los datos geográficos son representados en dos tipos de datos espaciales primarios: vectores y rásters (Figura 3).



26

Figura 3. Representación de (a) objetos en la superficie terrestre según los dos tipos de datos espaciales primarios: (b) vectores y (c) rasters. Elaboración propia.

Vectores

Los vectores son una representación de datos espaciales que utilizan tres formas geométricas básicas: puntos, líneas y polígonos:

-Puntos.

Se consideran los vectores más simples, compuestos de un solo vértice en una coordenada. Se utilizan para representar objetos individuales, como edificios, lugares, etc. En el ejemplo de la Figura 3 podemos observar que este tipo de objeto espacial es utilizado para representar dos árboles (puntos verdes en Figura 3b).

-Líneas.

Son una serie de vértices conectados entre sí. Sirven para representar elementos que son lineales por naturaleza (e.g. caminos, ríos, fallas). En la Figura 3b el camino que atraviesa la Figura 3a es representado a través de esta geometría.

-Polígonos.

También se conforman por una serie de vértices conectados pero en donde el primer y último vértice son el mismo, creando así un objeto es-

pacial cerrado. Se utilizan para representar áreas y límites (e.g. parcelas, tipos de suelo, tipos de vegetación, límites comunales), como la casa y el lago de la Figura 3b.

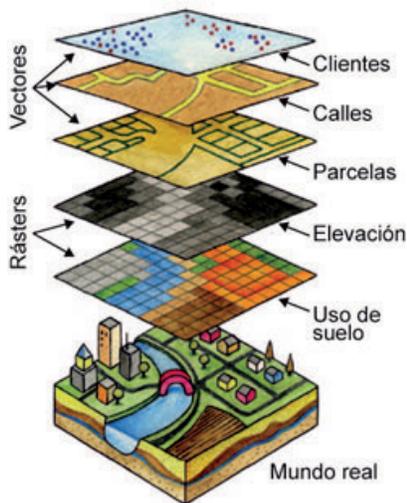
Rásters

También denominados mallas, los rásters se conforman por píxeles o celdas en un arreglo de filas y columnas. Cada uno de estos píxeles tiene un valor o clase y representa una zona geográfica (tanto en área como en ubicación). Este tipo de representación es especialmente útil para datos que varían de manera continua a través del espacio, como la elevación, la temperatura o la vegetación. En la Figura 3c podemos observar que la discretización de los elementos de la Figura 3a se traduce en píxeles de distintos colores, lo cuales estarían representando las distintas clases de objetos presentes en la superficie terrestre. Con ese ejemplo también es posible ver que la discretización depende del tamaño del píxel. Es decir, mientras más pequeño el píxel, mayor exactitud y detalle podrá ser representado. No obstante, a menor tamaño de píxel, mayor será el requerimiento de almacenamiento y procesamiento en la computadora.

27

Modelo de Capas

Una de las características más poderosas de los SIG es su capacidad para manejar datos geográficos mediante un modelo de capas. Este modelo permite que diferentes tipos de datos espaciales (vectores y rásters) se organicen en capas independientes que pueden superponerse y analizarse en conjunto (Figura 4). Cada capa contiene un tipo específico de datos, como carreteras, edificios, vegetación, o cuerpos de agua. Al combinar varias capas, los usuarios pueden realizar análisis espaciales complejos y obtener información detallada sobre cómo diferentes elementos interactúan en el espacio geográfico. Este modelo es fundamental para la generación de mapas temáticos y para la identificación de patrones espaciales en una gran variedad de aplicaciones.



28

Figura 4. Modelo de capas utilizado en los SIG. Adaptado de *A GIS as a Layered Cake* [Dibujo], por Saylor Academy, 2012, saylordotorg (https://saylordotorg.github.io/text_essentials-of-geographic-information-systems/section_05/f2619b76bbod1dof74boe8d8oba33496.jpg). CC BY 3.0

Aplicaciones en la educación ambiental

Los intentos por utilizar los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la educación ambiental no son recientes. Desde los años 90, diversos acercamientos han evolucionado paralelamente a los avances en capacidades computacionales, la expansión del internet y nuestra creciente interacción con nuevas tecnologías (Cheung & Brown, 2001). No obstante, estos intentos han sido heterogéneos y limitados, con la mayoría de las aplicaciones desarrollándose en ambientes escolares y bajo diversas estrategias educativas (Hong, 2015; Konstantakatos & Galani, 2023; Witham Bednarz, 2004). Esta implementación también enfrenta una serie de barreras a pesar de los avances tecnológicos. Dentro de estas problemáticas podemos mencionar:

- La necesidad de una capacitación especializada para los docentes o investigadores que deseen aplicar los SIG dentro de su ambiente educativo. De manera inherente, el uso de los SIG requiere co-

nocimientos técnicos en la manipulación de datos geográficos y el software especializado. En consecuencia, la curva de aprendizaje que se genera puede ser pronunciada para los interesados que no tienen experiencia previa con este tipo de programas (Bernhäuserová et al., 2022).

- Aplicación adecuada de estrategias pedagógicas. Estas son cruciales para asegurar que los SIG se utilicen de manera efectiva en el proceso de enseñanza-aprendizaje (Kerski, 2021). Esto se vuelve un problema cuando las herramientas tecnológicas se integran en el aula sin una planificación metodológica clara. En consecuencia, la aplicación de los SIG puede llegar a ser superficial, sin explotar todo su potencial educativo. No obstante, una forma de apalear esta problemática radica en la adaptación de los SIG a las necesidades de los estudiantes, utilizando enfoques pedagógicos que favorezcan el aprendizaje interactivo y basado en problemas.
- Acceso a infraestructura tecnológica adecuada. En años recientes los SIG han mejorado en términos de accesibilidad con la aparición de plataformas en línea y software gratuito como QGIS. Sin embargo, los espacios educativos a menudo carecen de las capacidades computacionales necesarias para ejecutar software tipo SIG de manera eficiente (Bernhäuserová et al., 2022). Este problema es particularmente pronunciado en regiones con recursos limitados, donde las escuelas pueden no contar con el equipo adecuado o acceso a datos geospaciales de calidad.

29

Por otro lado y a pesar de los desafíos, los SIG ofrecen numerosas ventajas cuando se aplican adecuadamente en la educación ambiental. Entre algunas de estas se pueden mencionar:

- Desarrollo del pensamiento espacial. El pensamiento espacial implica un conjunto de habilidades cognitivas que permiten a los estudiantes entender las interrelaciones espaciales entre diferentes objetos y fenómenos, como: la capacidad de reconocer patrones, dimensiones, proximidad y localización (National Research Council, 2006). En ese sentido, los SIG proporcionan una plataforma interactiva en la que los estudiantes pueden manipular capas de datos espaciales para visualizar cómo interactúan los sistemas naturales y antrópicos, facilitando así la comprensión de los proce-

30 sos ambientales complejos (Kerski, 2021).

- Utilización de los SIG en enfoques de aprendizaje basado en problemas. Los estudiantes no solo aprenden sobre las interrelaciones del mundo físico, sino que también pueden usar los SIG para analizar y visualizar problemas ambientales reales y desarrollar estrategias para resolverlos. Esta metodología fomenta un enfoque activo y participativo en el aprendizaje, donde los estudiantes se convierten en solucionadores de problemas y adquieren competencias críticas en el manejo de datos espaciales (Kerski, 2021).
- Promoción de una conexión más profunda de las comunidades con su entorno (Kerski, 2021). El avance de las tecnologías ha democratizado el acceso a la recolección de datos geográficos, lo que permite a las comunidades locales participar activamente en la observación y el monitoreo de su entorno. Este enfoque puede impulsar la participación ciudadana y fomentar una mayor conciencia ambiental, ya que los estudiantes y las comunidades pueden utilizar los SIG para identificar problemas ambientales locales y desarrollar soluciones basadas en datos reales. Esto no solo mejora el aprendizaje, sino que también empodera a los ciudadanos para actuar sobre los problemas ambientales en sus propias comunidades.

A pesar de las barreras es notable que las ventajas de utilizar los SIG como herramientas de la educación ambiental es obvia. Por ello, a continuación se abordaran tres grandes temáticas para ilustrar cómo los SIG podrían aprovecharse en la educación ambiental de la población en general.

Patrimonio natural

El patrimonio natural está profundamente entrelazado en muchas regiones de nuestro país con la identidad social y cultural de las comunidades locales. Es por ello que su conservación es crucial, no solo para mantener su valor ecológico, sino también para preservar las tradiciones y valores asociados. Por lo tanto, entender las relaciones espaciales de este y los cambios que sufre puede ser una herramienta para incentivar acciones hacia la conservación y sustentabilidad.

Algunos de los análisis que se pueden realizar para lograr un entendimiento sobre las dinámicas del patrimonio natural caen en el ámbito de la

detección de cambios en la superficie. Estos se basan en la identificación de diferencias, a través del tiempo, del estado de un objeto o fenómeno (Alqurashi & Kumar, 2013). Dentro de la gran variedad de este tipo de análisis, algunas de las aplicaciones que son relevantes para la educación ambiental son los estudios de cambio de uso de suelo y vegetación. Este tipo de estudios no solo proporcionan una evaluación cuantitativa del estado actual de los recursos naturales de una región, sino que también ofrecen una perspectiva histórica sobre los cambios en el territorio. Esta cuantificación de los cambios en el patrimonio natural es esencial para abordar temas como la pérdida de la biodiversidad, el cambio climático y la seguridad alimenticia (Alqurashi & Kumar, 2013). Esto se pone de relevancia al saber que para 2015 se tenía una estimación de que los seres humanos hemos alterado al rededor de tres cuartos de la superficie terrestre (Arneth, A. et al., 2019).

Uno de los principales insumos para llevar a cabo estos estudios son las imágenes satelitales, fotografías aéreas y de dron. Mucha de esta información, especialmente de la primera categoría, actualmente es libre (i.e. sin costo). Adicionalmente, las imágenes satelitales que sirven para el mapeo y cuantificación de los cambios en la superficie tienen un acervo significativo. Por ejemplo, la misión de los satélites Landsat han recopilado imágenes del planeta desde 1972 (Equipo de redacción de Ciencia, 2022). Esto significa que las investigaciones sobre el territorio pueden ser transversales y longitudinales, permitiendo una comprensión temporalmente más integral de las dinámicas presentes.

En este sentido, un ejemplo que podría aplicarse como parte de un programa de educación ambiental podría ser la visualización de efectos de cambios en la cobertura vegetal utilizando imágenes multiespectrales. En la Figura 5 podemos observar un ejercicio sencillo en donde a dos imágenes del satélite Sentinel-2 se les aplicó una composición de bandas en falso color. En ambas figuras, esta composición de infrarrojo muestra la misma área hacia el noroeste de Pichátaro, Mich., en el mes de diciembre de 2015 y 2023. Los colores rojos denotan la presencia de vegetación, y la intensidad del color representa la densidad y salud de la misma. En un ejercicio de sensibilización, la población objetivo podría interactuar y evaluar de forma visual cómo en la imagen de 2015 existía una gran pérdida de vegetación (i.e. bosques de pino-encino), mientras que en la imagen de 2023 se aprecia una notable recuperación. Este tipo de ejercicio puede ser particularmente útil para sensibilizar a las poblaciones locales sobre la

importancia de la gestión sostenible de los recursos naturales. La capacidad de visualizar los efectos de las intervenciones humanas en la cobertura vegetal facilita una comprensión tangible de los impactos ambientales y permite identificar áreas donde se podrían enfocar futuros esfuerzos de reforestación. Al involucrar a las comunidades en el análisis y la planificación, se fomenta un enfoque participativo en la conservación del entorno, promoviendo tanto el empoderamiento local como la sostenibilidad a largo plazo.



32

Figura 5. Composición en falso color infrarrojo de imágenes Sentinel-2. Las imágenes muestran la misma área, entre la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán y la comunidad de Pichátaro, Mich. Generado en Copernicus browser [Imágenes], por Copernicus, 2024, (<https://link.dataspace.copernicus.eu/zr5e>).

Peligros

Otra temática que podría funcionar como catalizador en la educación ambiental es la de los peligros. Estos se definen como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de origen natural, socio-natural o antropogénico, que podría producir daños en las personas, la producción, la infraestructura y los bienes y servicios, en un intervalo de tiempo y un área geográfica específicos (CENAPRED, s.f.). Dentro de las distintas categorías de peligro que existen, los peligros geológicos e hidrometeorológicos más comunes son los incendios, derrumbes, inundaciones, hundimientos del terreno, sequías y sismos, por mencionar algunos. Si bien todos ellos son procesos naturales en sí mismos, los desastres que se generan por su ocurrencia son socialmente construidos. Esto quiere decir que nuestra

incidencia como especie en los cambios que realizamos en nuestro entorno son los que propician y aumentan nuestra vulnerabilidad ante estos fenómenos.

La interacción entre las actividades humanas y los procesos naturales modifica las dinámicas de los fenómenos, incrementando la exposición y el riesgo de desastres. Por ejemplo, en el caso de las inundaciones, el crecimiento urbano desordenado y en zonas de riesgo (e.g. áreas cercanas o invadiendo cauces de ríos) agrava tanto la magnitud como la frecuencia de estos eventos. Una de las razones es que la capacidad natural del terreno para absorber el agua (i.e. infiltración) se ve alterada a medida que las ciudades expanden su infraestructura en áreas inadecuadas. En este sentido, la educación ambiental es crucial para generar conciencia sobre esta correlación. Por ejemplo, se podría realizar un análisis crítico acerca de la necesidad de implementar y acatar regulaciones de planeación urbana que tomen en cuenta los riesgos asociados a la ubicación geográfica y la intervención en el entorno.

En este sentido, un ejercicio formativo en educación ambiental podría consistir en la visualización de datos geoespaciales que muestren la relación entre el crecimiento urbano y las áreas propensas a inundaciones. Al hacer uso de los SIG y de imágenes satelitales, los estudiantes y participantes de programas educativos podrían observar cómo las decisiones de urbanización impactan la vulnerabilidad ante fenómenos hidrometeorológicos como las inundaciones. Este tipo de enfoque no solo sensibiliza a la población, sino que también fomenta una mayor participación en la planificación sostenible de sus comunidades.

Otra herramienta útil para el análisis de peligros son los índices derivados de imágenes satelitales multiespectrales. Estos índices se generan mediante la aplicación de operaciones matemáticas entre distintas bandas de una imagen satelital (Mishra et al., 2022). Un ejemplo relevante es el uso del Índice de Calcinación Normalizado (NBR, por sus siglas en inglés), que permite analizar áreas afectadas por incendios forestales. A través de este índice, se pueden identificar las áreas quemadas, los frentes activos de los incendios y la cantidad de vegetación perdida (Flores Rodríguez et al., 2021).

El uso de índices de calcinación en la educación ambiental ofrece múltiples beneficios. Primero, permite una cuantificación precisa de los daños ocasionados por los incendios, proporcionando una base objetiva para la discusión sobre las causas y las consecuencias de estos fenómenos. Se-

gundo, facilita el análisis de la recurrencia de incendios en determinadas zonas, vinculando estos eventos con factores humanos, como la deforestación, la quema agrícola o la expansión urbana en áreas boscosas.

En un ejercicio práctico, los estudiantes podrían trabajar con imágenes satelitales de áreas previamente afectadas por incendios. Por ejemplo, en la Figura 6 es posible observar el humo y las cicatrices de incendios en una combinación de bandas en color natural de una imagen satelital de una zona cercana a Morelia, Mich. Sin embargo, al aplicar el NBR, se pueden identificar con mayor claridad las áreas quemadas (representadas en color rosa) y los frentes de incendio activos (en rojo intenso). Este tipo de ejercicios no solo fomentan la comprensión de los procesos que llevan a la ocurrencia de incendios, sino que también promueven la reflexión sobre estrategias preventivas y no solo reactivas.

34

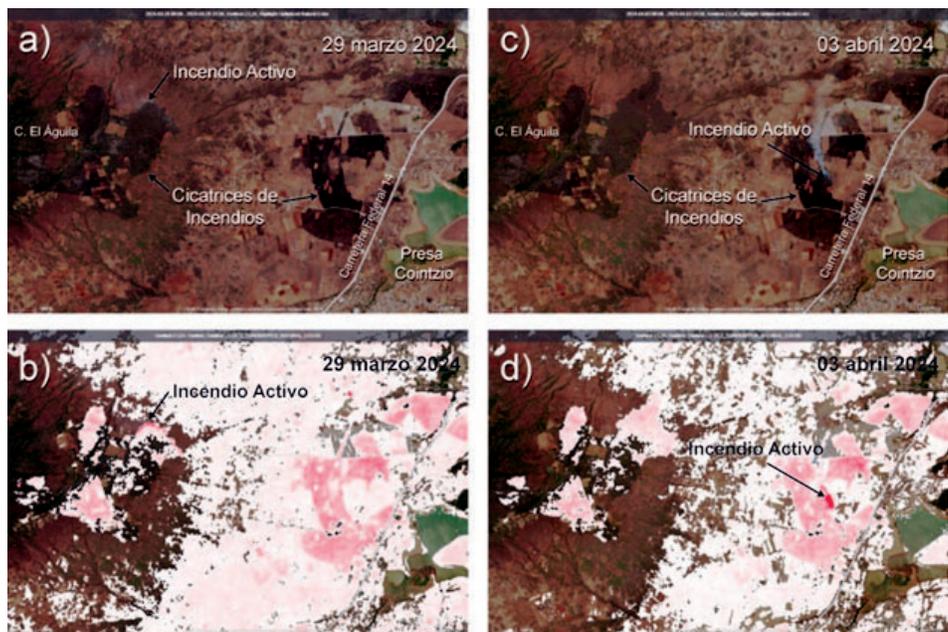


Figura 6. (a y c) Composición en color natural e (b y d) Índice de Calcinación Normalizado aplicado en imágenes Sentinel-2. Las imágenes muestran la misma área en dos fechas distintas, entre el cerro El Águila y la presa de Coitizio, al suroeste de Morelia, Mich. Generado en Copernicus browser [Imágenes], por Copernicus, 2024, (<https://link.dataspace.copernicus.eu/zr5e>).

Comentarios finales

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son un avance crucial en la capacidad humana para entender y gestionar el entorno. Originalmente concebidos como herramientas para manejar grandes volúmenes de datos geográficos, los SIG han crecido en complejidad y versatilidad, abarcando diversos campos. En particular, su aplicación en la educación ambiental ofrece una plataforma interactiva que permite a estudiantes y profesionales visualizar y analizar las interacciones entre sistemas naturales y humanos. Los SIG, con su capacidad para integrar información de múltiples fuentes y simplificar datos complejos, facilitan una comprensión más profunda del entorno y promueven una toma de decisiones informada. Sin embargo, su uso en la educación aún enfrenta desafíos significativos, como la necesidad de formación técnica especializada y la falta de infraestructura adecuada en algunas instituciones. A pesar de esto, los SIG ofrecen una variedad de herramientas para abordar problemas ambientales y se posicionan como herramientas poderosas para la alfabetización ambiental y la participación ciudadana en la conservación del entorno.

35

Referencias

- Alqurashi, A. F., & Kumar, L. (2013). Investigating the Use of Remote Sensing and GIS Techniques to Detect Land Use and Land Cover Change: A Review. *Advances in Remote Sensing*, 02(02), 193-204. <https://doi.org/10.4236/ars.2013.22022>
- Arneth, A., Denton, F., Agus, F., Elbehri, A., Erb, K., Osman Elasha, B., Rahimi, M., Rounsevell, M., Spence, A., & Valentini, R. (2019). Framing and Context. En Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., Vyas, P., Huntley, E., ... Malley, J. (Eds.), *Climate Change and Land: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems* (1.^a ed.). IPCC. <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157988/type/book>
- Bernhäuserová, V., Havelková, L., Hátlová, K., & Hanus, M. (2022). The Limits of GIS Implementation in Education: A Systematic Review. *IS-*

PRS International Journal of Geo-Information, 11(12), 592. <https://doi.org/10.3390/ijgi11120592>

Carter, R. L., & Simmons, B. (2010). The History and Philosophy of Environmental Education. En A. M. Bodzin, B. Shiner Klein, & S. Weaver (Eds.), *The Inclusion of Environmental Education in Science Teacher Education* (pp. 3-16). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9222-9_1

CENAPRED. (s.f.). Amenaza. En Glosario. Recuperado el 13 de septiembre de 2024, de <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/IGOPP/glosario.php>

Cheung, R. L., & Brown, S. C. (2001). Designing a Distributed Geographic Information System for Environmental Education. *K-12 Education and Library Science*. 21st Annual Esri International User Conference, San Diego, California EUA. <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc01/professional/papers/pap409/p409.htm>

Copernicus. (2024). Copernicus browser [Imágenes]. <https://link.data-space.copernicus.eu/zr5e>

36

Equipo de redacción de Ciencia. (2022). Landsat cumple 50 años observando la Tierra desde el espacio. <https://ciencia.nasa.gov/ciencias-terrestres/landsat-cumple-medio-siglo-observando-la-tierra-desde-el-espacio/>

Escobar, F., Hunter, G., Bishop, I., & Zerger, A. (2005). Introduction to GIS. *Department of Geomatics, The University of Melbourne*, 13.

Flores Rodríguez, A. G., Flores-Garnica, J. G., Gonz´alez-Eguiarte, D. R., Gallegos-Rodríguez, A., Zarazúa-Villaseñor, P., & Mena-Munguía, S. (2021). Análisis comparativo de índices espectrales para ubicar y dimensionar niveles de severidad de incendios forestales. *Investigaciones Geográficas*, 106. <https://doi.org/10.14350/ig.60396>

Harley, J. B. (1987). The Map and the Development of the History of Cartography. En J. B. Harley & D. Woodward (Eds.), *Cartography in Prehistoric, Ancient, and Medieval Europe and the Mediterranean* (Vol. 1, pp. 1-6). The University of Chicago Press. https://press.uchicago.edu/books/HOC/HOC_V1/HOC_VOLUME1_chapter1.pdf

Hong, J. E. (2015). Teaching GIS and Other Geospatial Technologies to In-Service Teachers. En O. Muñiz Solari, A. Demirci, & J. Schee (Eds.), *Geospatial Technologies and Geography Education in a Changing World* (pp. 117-126). Springer Japan. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55519-3_10

- Kerski, J. (2021). What are the 10 most important educational benefits that GIS fosters? [ESRI]. *Education Blog*. <https://community.esri.com/t5/education-blog/what-are-the-10-most-important-educational/ba-p/1094091>
- Konstantakatos, G., & Galani, L. (2023). How is the use of GIS in geographical and environmental education evaluated? Findings from a systematic review. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 32(2), 159-175. <https://doi.org/10.1080/10382046.2022.2138167>
- Lapaine, M., Midtbø, T., Gartner, G., Bandrova, T., Wang, T., & Shen, J. (2021). Definition of the Map. *Advances in Cartography and GIScience of the ICA*, 3, 1-6. <https://doi.org/10.5194/ica-adv-3-9-2021>
- Mishra, M., Singh, K. K., Pandey, P. C., Devrani, R., Pandey, A. K., Raju, K. P., Ranjan, P., Arora, A., Costache, R., Janizadeh, S., Linh, N. T., & Pandey, M. (2022). Spectral Indices Across Remote Sensing Platforms and Sensors Relating to the Three Poles: An Overview of Applications, Challenges, and Future Prospects. En M. Pandey, P. C. Pandey, Y. Ray, A. Arora, S. D. Jawak, & U. K. Shukla (Eds.), *Advances in Remote Sensing Technology and the Three Poles* (1.^a ed., pp. 83-116). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119787754.ch6>
- National Research Council. (2006). *Learning to Think Spatially: GIS as a Support System in the K-12 Curriculum* (p. 11019). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11019>
- Reddy, G. P. O. (2018). Geographic Information System: Principles and Applications. En G. P. O. Reddy & S. K. Singh (Eds.), *Geospatial Technologies in Land Resources Mapping, Monitoring and Management* (pp. 45-62). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78711-4_3
- Saylor Academy. (2012). A GIS as a Layered Cake [Dibujo]. Saylor dot org. https://saylor dot org. github. io/ text_ essentials- of- geographic- information- systems/ section_ 05/ f2619b76bbod1dof74boe8d80ba33496. jpg
- Tomlinson, R. F. (1988). The Impact of the Transition From Analogue to Digital Cartographic Representation. *The American Cartographer*, 15(3), 249-262. <https://doi.org/10.1559/152304088783886937>
- UNESCO-UNEP. (1976). The Belgrade Charter. *Connect: UNESCO-UNEP Environmental Education Newsletter*, 1(1), 1-2.
- Witham Bednarz, S. (2004). Geographic Information Systems: A Tool

to Support Geography and Environmental Education? *GeoJournal*,
60(2), 191-199. <https://doi.org/10.1023/B:GEJO.0000033574.44345.c9>

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS PARA LA EDUCACIÓN AMBIENTAL INTERCULTURAL

Netzahualcoyotl Flores Lázaro

Maestría en Educación Ambiental de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán. Carretera Pátzcuaro-Huecorio Km 3, Pátzcuaro, Michoacán, C.P. 61614. E-mail: netzahualcoyotl.flores@uiim.edu.mx

Resumen

La degradación ambiental causada por los procesos antropogénicos es la causa principal de la pérdida de ecosistemas, estos nos proporcionan servicios ecosistémicos como: alimentos, fibra, agua limpia, entre otros. Este estudio aborda, la oferta potencial de servicios ecosistémicos hidrológicos y su contribución a la Educación Ambiental Intercultural, para la subcuenca del río Cupatitzio. Para lograr el objetivo; cuantificamos y mapeamos la oferta potencial de Servicio ecosistémico hidrológico, por cobertura vegetal, por medio de imágenes de satélite Sentinel 2.

39

Los resultados encontrados muestran que la cobertura vegetal de pino encino y sus asociaciones son las que más contribuyen con la oferta del servicio ecosistémico de infiltración, las zonas de ubicación de estas coberturas corresponden a la parte alta de la zona de estudio donde se localizan comunidades originarias. Consideramos que la información generada con base en el marco metodológico del concepto de Servicios ecosistémicos tiene un carácter relevante para la educación ambiental Intercultural, lo que contribuye al bienestar de las sociedades, que a pesar de sus diferencias culturales, se tienen que afrontar para construir un futuro sustentable y sostenible del territorio rural.

Palabras clave: Degradación del suelo, evaluación biofísica, servicios ecosistémicos educación ambiental intercultural.

Introducción

Entre los problemas ambientales de mayor impacto que afrontan las sociedades actuales se encuentran: el deterioro de cuencas por la degradación del suelo a causa de la erosión, la pérdida de materia orgánica, la contaminación, la compactación, la pérdida de la biodiversidad, las inundaciones y los procesos de remoción en masa. Todos ellos producidos o intensificados por la actividad humana (MEA, 2003; Le et al., 2014; Ehrlich et al., 2012; Zurruta et al., 2015; Sosa-Rodríguez, 2015) algunos de ellos se han agravado durante las últimas décadas.

40 El proceso antropogénico más recurrente y de mayor impacto es el cambio de uso del suelo, afectando de manera negativa la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas (Rounsevell et al., 2010; Collins et al., 2011; Martín-López, et al., 2011; Robinson, et al., 2013; Dominati, et al., 2010). Los ecosistemas nos proporcionan bienes, como pueden ser la madera y los alimentos; y también servicios entre los que se encuentran la regulación del flujo y la calidad del agua, que en conjunto se han denominado “Servicios Ecosistémicos” (en adelante SE) (Costanza et al., 1997; MA, 2005; Balvanera, 2012;) y se definen como: “beneficio de la naturaleza para las personas”. El concepto SE incluye todas las contribuciones de la naturaleza a las personas, tanto positivas como negativas (IPBES, 2019) y los clasifica en: Servicios/Beneficios de Provisión, Servicios/Beneficios de Regulación y Servicios/Beneficios Culturales. En ese sentido, la cobertura vegetal es un factor determinante, responsable de la prestación de los servicios ecosistémicos entre los cuales podemos señalar los productos forestales, madereros y no madereros, la regulación de la temperatura del agua, el secuestro de carbono, la protección del suelo o la recreación cultural (Balvanera et al., 2012).

Para atender los problemas globales de la degradación ambiental, la Comisión Brundtland (WCED 1987) definió el desarrollo sostenible como “un desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. Esto se puede hacer operativo mediante la integración de las dimensiones social, económica y ecológica (Hediger 1999; Elkington 1994). Así la Educación Ambiental, contribuye extraordinariamente a la operacionalidad del concepto de desarrollo sostenible, porque el actual modelo socioeconómico de las sociedades de los países desarrollados es insostenible, pues lleva aparejados importantes problemas ambientales

que ponen en riesgo la supervivencia de la Tierra, por lo que es necesario un nuevo modelo de sociedad que haga posible un futuro más sostenible y, en ello, la educación ambiental juega un papel clave (Marcote V., et al., 2007). En este sentido, con base en el reconocimiento multifuncional de los nuevos paradigmas en la gestión del territorio las políticas deben ser formuladas a partir de la práctica investigativa inter, multi y transdisciplinaria, a partir de las cuales se incluyen conceptos y métodos múltiples (provenientes de la geografía, antropología, sociología, ecología, historia, economía, agronomía, entre otras), acerca de la diversidad de prácticas y saberes que cada grupo humano construye en su territorio (Barrera-Basols y Floriani 2018)..

Así la educación ambiental se constituye como una herramienta esencial en el desarrollo sustentable, y su alcance es mayor cuando su visión se fundamenta en lo intercultural. Porque es necesario reconocer el conocimiento local, ya que el conocimiento tradicional se refiere a: habilidades y técnicas que conforman un entendimiento de la realidad de una comunidad y son parte de la cosmovisión de un pueblo. Es un conocimiento milenario y se ha producido a lo largo de los años por el contacto cotidiano de los seres humanos con el medio ambiente. A partir de identificar climas, ciclos de las plantas, temporadas de frío o lluvia, hábitos de animales e insectos, de observar y experimentar con las plantas y animales, obtienen alimentos, materias primas, herramientas, que en conjunto forman parte de la identidad cultural y se expresa de diferentes maneras: la gastronomía, el vestido, costumbres, tradiciones, lenguaje, celebraciones, ritos y mitos, técnicas y procedimientos. (CONABIO-GIZ. 2017).

En este sentido, la delimitación conceptual del término interculturalidad, así como su desarrollo y paradigmas educativos, desde los que se ha analizado el fenómeno intercultural como alternativa educativa, para afrontar la diversidad cultural característica de las sociedades occidentales democráticas. La perspectiva intercultural en educación surge como consecuencia de la confrontación de dos o más culturas dentro de una misma sociedad en la cual deben coexistir y supone la última fase de un proceso que se inicia cuando en los años sesenta emergen los movimientos de revitalización étnica. En ese momento las naciones occidentales ya se caracterizaban por una enorme diversidad étnica, cultura y racial en la que podían reconocerse dos grandes grupos: a) Minorías culturales ya existentes (vascos en España y Francia, alemanes en Dinamarca, daneses en Alemania, galeses y escoceses en el Reino Unido, amalgamas diversas

en EE. UU., Canadá y Australia). b) Nativos de estas nuevas naciones que habían sido desplazados, entre ellos negros africanos (Oдина, M. T. A., 1991).

Finalmente, ante la falta de referencias que ayuden a profundizar la reflexión sobre el ámbito de interacción entre las relaciones sociedad, naturaleza y economía, la revisión de literatura revisada da cuenta, de cómo los servicios ecosistémicos contribuyen y dan un sustento sólido, proporciona ideas y criterios para pensar e instrumentar un proyecto de profesionalización de prácticas educativas enfocado a la intersección entre lo sustentable y lo intercultural (Baronnet, B., et al., 2018), tanto en términos de enfoques teóricos y epistemológicos como en el diseño de estrategias y metodologías, existen avances sustanciales en la investigación sobre la educación, sobre la sustentabilidad y sobre la interculturalidad, sin embargo, aún hay asignaturas pendientes.

42

Por lo anterior, en este trabajo tiene como objetivo proponer un marco metodológico del concepto de Servicios Ecosistémicos, con sólido sustento teórico y aplicación práctica, para el programa de educación ambiental con enfoque intercultural, realizamos un caso de aplicación en la subcuenca del río Cupatitzio, donde analizamos la oferta potencial del servicio ecosistémico hidrológico de provisión de agua, región donde se observa un desbalance entre las zonas productoras de servicios ecosistémicos y las zonas beneficiarias de estos.

Marco teórico conceptual

Definición y clasificaciones de los SE

Desde el 2005 diversas instituciones han impulsado el desarrollo del concepto de SE, (MEA, 2005 Figura 1; TEEB, 2008; IPBES 2012), Fig. 1 y más recientemente en 2014 Natural Capital Coalition (NCC) e IPBES 2019. La investigación de los SE ha progresado desde entonces en diferentes niveles, desde la conceptualización teórica hasta las aplicaciones prácticas. Cuantificación, mapeo y valoración de los servicios de los ecosistemas han sido el objetivo central de varios autores y proyectos con el fin de integrar el concepto para la toma de decisiones (Fisher et al., 2009. De Groot et al., 2010; Rounsevell et al., 2010; Balvanera, 2012 ; Braat y de Groot, 2012; Egoh et al., 2012; Seppelt et al., 2011; Potschin et al., 2016, Costanza et al., 2017).

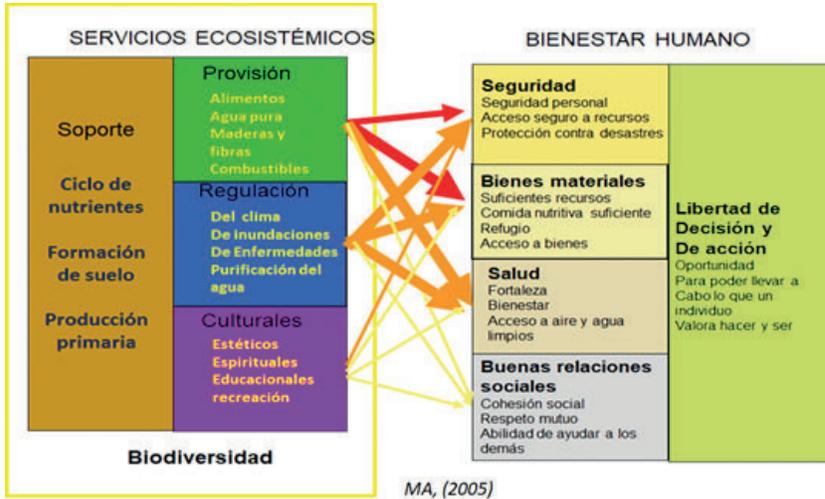


Figura 1. Concepto de Servicios ecosistémicos. Fuente: MAE 2005.

Los SE son condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies que los constituyen sustentan y satisfacen a la vida humana (Daily, 1997); es la capacidad de los procesos y componentes naturales para proporcionar bienes y servicios que, directa o indirectamente, benefician a la humanidad o tienen potencial para hacerlo en el futuro (Costanza et al, 1997; De Groot, et al, 2002; MA, 2003; U.S. EPA, 2004; Fisher et al., 2009); son componentes de la naturaleza (disfrutados, consumidos o directamente usados) para producir bienestar humano (Boyd y Banzhaf, 2007). “la contribución directa o indirecta de los ecosistemas al bienestar humano” (Hedden-Dunkhorst et al., 2015). Mas recientemente la Plataforma Intergubernamental Científico-normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES) propone la expresión “activos antropógenos” para enfatizar el hecho de que una buena vida se logra por medio de beneficios producidos conjuntamente por la naturaleza y las sociedades, siendo uno de ellos los conocimientos indígenas y locales. (Montana y Borie, 2016).

En lo que se refiere a la clasificación, un número importante de autores ha intentado construir tipologías de SE (Costanza, 1997; Daily, 1999; de Groot, 2002, 2006). La clasificación que ha tenido mayor difusión y acep-

tación a nivel internacional fue propuesta por MA (2005). Sin embargo, Carpenter et al. (2006) y Sachs y Reid (2006) han admitido la necesidad de tomar los conceptos de esta clasificación como no estáticos; es decir, que necesariamente tienen que ir evolucionando. Con base en la evidencia de un significativo consenso sobre los marcos metodológicos de los SE, diversos autores señalan que los marcos existentes todavía tienen asignaturas pendientes (Boyd y Banzhaf, 2007; Costanza, 2008; Fisher y Kerry Turner, 2008; Wallace, 2007).

44 En el año 2010 se publicó la Clasificación Internacional Común de los Bienes y Servicios Ecosistémicos (CICES) con la finalidad de integrar en esta temática el ambiente y la contabilidad económica, diferenciándose de la primera clasificación (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio), al considerar a los servicios de apoyo y soporte como parte de la estructura, procesos y funciones de los ecosistemas (Haines y Potschin, 2010). Desde esta perspectiva se define a los SE como las contribuciones que los ecosistemas hacen al bienestar humano, refiriéndose a los productos finales de los sistemas ecológicos que surgen de la interacción entre procesos bióticos y abióticos (Braat y de Groot, 2012; Egoh et al., 2012; Seppelt et al., 2011). Por último, De Groot et al. (2010) consideran que hay un amplio consenso en utilizar el marco adoptado por TEEB (dando seguimiento a la propuesta de MA), elaborado por Haines y Potschin (2010) y Potschin et al. (2016). Donde a partir de la estructura o procesos biofísicos, se generan una serie de funciones que se traducen en servicios de los cuales se benefician las comunidades humanas Haines y Potschin (2010), y que pueden ser valorados desde una perspectiva ecológica, económica y social. El marco en cascada vincula los procesos ecológicos con elementos del bienestar humano que siguen un patrón similar a una cadena de producción (La Notte et al., 2017).

Finalmente, el IPBES (Díaz et al., 2018) reconoce explícitamente las conceptualizaciones, más amplio de valores y la valoración. Para reflejar estos avances, el marco conceptual de IPBES estableció la noción de “Contribuciones de la naturaleza a las personas” (NCP) por sus siglas en inglés. Las NCP pueden evaluarse desde dos perspectivas complementarias (Díaz et al., 2015). Primera, la perspectiva generalizadora incluye 17 NCP, organizados en tres grupos: contribuciones reguladoras, materiales y no materiales que se corresponden en gran medida con los servicios culturales, de aprovisionamiento y culturales del MA (2005), para capturar completamente el hecho de que el concepto incluye todas las contribuciones a

las personas, tanto positivas (beneficios) y negativo (detrimentos). IPBES busca un enfoque pluralista de valores y del conocimiento incorporando un amplio conjunto de ontologías, epistemologías y axiologías occidentales y no occidentales de las relaciones entre la naturaleza humana. El término NPC ayudaría mejor a cumplir este objetivo (Kenter, 2018).

Los SE como vínculo entre sociedad y territorio

Establecer vínculos entre el manejo de cuencas hidrográficas con los SE hidrológicos y con los beneficios sociales y económicos es un desafío. Este enfoque de SE pretende analizar los diferentes tipos de vínculos entre la sociedad y la naturaleza como parte de un territorio, o la manera en que distintos actores sociales pueden aprovechar los servicios que ofrecen los ecosistemas (Quétier *et al.*, 2007; Díaz *et al.* 2018). De allí la importancia de comprender los vínculos entre los sistemas naturales y socioeconómicos, si partimos de esa relación podemos conducir a una gestión mejorada y más sostenible de los ecosistemas (Guerry *et al.*, 2015).

Otra visión sugiere que el bienestar humano no solo depende de la naturaleza, sino también de otros elementos del paisaje que deben tenerse en cuenta (Carlisle *et al.*, 2009), entre los que se encuentran los servicios culturales y de aprovisionamiento, estos son más experimentados y apreciados intuitivamente por las personas, y mantienen cercanía con otras áreas del bienestar y del desarrollo humano (Daniel *et al.*, 2012; Plieninger *et al.*, 2013), lo cual sugiere que podría ser el vehículo más efectivo para comunicar la importancia de proteger los ecosistemas (Orenstein, 2013; Gobster *et al.*, 2007). La identificación de los vínculos locales entre los ecosistemas y la sociedad es importante debido a que tiene el potencial de resaltar las compensaciones que pueden existir entre los posibles beneficiarios (Howe *et al.*, 2014)

45

Valoración de SE para la planeación territorial

Actualmente, el aporte sobre la valoración económica de los bienes y de los servicios ambientales que otorgan los ecosistemas a la planificación, ordenación y gestión integral de los territorios es cada vez mayor, y tiene mayor consideración a nivel mundial (Villanueva *et al.*, 2015). La aplicación del concepto de SE es prometedora en contextos de planificación multisectoriales de alta relevancia política, como es el caso de la planifica-

ción en la prevención de desastres (Sitas *et al.*, 2014), puede constituir la base para la toma de decisiones sobre la gestión del uso de suelo y de los recursos naturales (Figura 2).



Figura 2. Valoración de los bienes y servicios ecosistémicos.
Fuente: elaboración propia.

Las diferentes dimensiones de valor (ecológico, cultural, económico, de interés particular, público o ético) deben estar incluidas en la toma de decisiones, así como su justificación (Kelemen *et al.*, 2015). Descubrir y obtener estos valores necesariamente requiere la integración de diversos enfoques (Martín-López *et al.*, 2014; IPBES, 2015). La investigación del valor del paisaje surge por la necesidad de ayudar a la planificación del uso del suelo y la gestión ambiental, debido a impactos ecológicos y socioeconómicos por desastres naturales y las propias actividades humanas (Molina *et al.*, 2016).

La valoración económica ambiental en la planeación del territorio permite discutir y fundamentar las políticas públicas en términos fácilmente comprensibles para los distintos grupos de interés, también comparar los beneficios de diferentes alternativas, orientando la toma de decisiones sobre el uso de los suelos, en términos de costo-beneficio. Por otro lado, puede ser una herramienta de apoyo para maximizar los beneficios ambientales o fijar valores de recursos naturales no reflejados en el mercado (de Anguita, 2004; Cristache y Penna, 2008).

Otra consideración importante es que mientras los instrumentos de planificación del territorio constituyen una herramienta que tiene la finalidad de incrementar el valor social en forma equitativa y sustentable, en general, los métodos de valoración ambiental privilegian la valoración individual y privada frente a la social y la pública (Wilson y Howarth, 2002).

Oferta biofísica potencial de los servicios ecosistémicos

Desde un punto de vista metodológico, el análisis espacial de SE tiene dos dimensiones: una evaluación biofísica de la oferta (la producción de SE por los ecosistemas) y una evaluación socioeconómica del valor por unidad de flujo. La evaluación requiere un cierto conocimiento subyacente de lo físico y de lo biológico, relaciones que determinan la cantidad y calidad de los SE (Freeman *et al.*, 2014). En consecuencia, la variación en el valor de SE puede provenir de tres fuentes: a partir de la estimación de los flujos biofísica de servicios para valores constantes, de los valores de SE variables para flujos de servicio constantes o una combinación de ambas dimensiones. Esta combinación de geometría variable conduce a la aplicación de varias metodologías estándar en el análisis espacial de SE (Eigenbrod *et al.*, 2010)

Partiendo del reconocimiento de que el valor de los SE es la contribución relativa de los ecosistemas al bienestar (Turner *et al.*, 2016). Esta aportación puede expresarse en varias unidades (cualquier unidad de los cuatro tipos de capital: natural, construido, social y humano), donde las unidades monetarias son a menudo las más utilizadas y convenientes ya que la mayoría de las personas otorga valor desde estas unidades. Sin embargo, se pueden usar otras, como el tiempo, la energía y la tierra. La selección dependerá de qué unidades ayuden a comunicarse mejor con diferentes partes interesadas en un determinado contexto de toma de decisiones (Farley y Costanza, 2010; Leimona, 2011; Costanza *et al.*, 2014).

Por ello, la Economía Ecológica como la ciencia de la gestión de sostenibilidad, asume que la humanidad y su economía deben someterse a los límites biofísicos (Martínez Alier, 2001; Farber *et al.*, 2002; Gómez-Baggeth y Naredo, 2015), considerando que los SE constituyen flujos de energía, materia e información de los sistemas ecológicos.

En este contexto, cuantificar los beneficios de los SE con información biofísica y no solo económica proporciona alternativas significativas para los usuarios, si centramos la atención en el caso de la cuenca, teniendo en cuenta la perspectiva de los usuarios de servicios de agua, podemos ayudar a aumentar o mantener el financiamiento necesario para darle mantenimiento (Kroeger *et al.*, 2019; Vogl *et al.*, 2017; Warziniack *et al.*, 2017).

48

La valoración económica de los SE no puede ser independiente, ya que debe ser respaldada por las métricas de producción, entrega y consumo de SE. (Pandeya *et al.*, 2016). Debe integrarse estrechamente con otros enfoques de valoración, incluida la medición biofísica en términos de bienestar humano; sin embargo, esta comprensión biofísica no se ha materializado. Requiere no sólo de un inventario de los SE sino también de una estimación de la tasa de provisión y demanda de dichos servicios y de una evaluación de cómo las actividades antrópicas modifican su provisión (Fisher *et al.*, 2009; Grizzetti *et al.*, 2016). Los problemas surgen porque es difícil obtener valores

significativos para los bienes y servicios que proporcionan los ecosistemas y para los cuales no existe un mercado formal. Una amplia gama de servicios de los ecosistemas entra en esta categoría (Pearce, 2002; Turner, 2010).

Identificación de las partes interesadas gestores y beneficiarios de los servicios ecosistémicos

En la actualidad existe una marcada tendencia sobre la investigación de los sistemas de gobernanza (Lattera *et al.*, 2017) ya que favorecen la internalización del enfoque de SE a las políticas públicas, la gestión sostenible de los SE y la distribución justa y equitativa de sus beneficios entre diferentes actores sociales (Bennett *et al.*, 2016; Daw *et al.*, 2011; Fisher *et al.*, 2014). Para materializar el valor de los servicios ecosistémicos es necesario en primer lugar identificar todas las posibles partes interesadas en la gestión de los SE de la cuenca, como pequeños propietarios, comunidades locales, autoridades gubernamentales, organizaciones ambientales

y empresas, entre otros (Anzaldúa *et al.*, 2018). Así, el contexto biofísico de la cuenca es complementado por un contexto humano, la disponibilidad de todos los bienes y servicios ecosistémicos que las personas precisan del ecosistema depende de la capacidad del ecosistema para subsistir. Sin embargo, las fuerzas motrices que afectan la capacidad de la cuenca hidrográfica para proveer y regular de una forma adecuada y sostenible estos bienes y servicios son de naturaleza socioeconómica y política (Jefferson *et al.*, 2014).

El vínculo entre los ecosistemas naturales y la sociedad también resalta el factor humano como principal responsable de cambio, pues la relación es estrecha, desde diversos puntos de vista: económicos, sociales, cognitivos (TEEB, 2010; Bateman *et al.*, 2013). La comprensión de estas interrelaciones puede conducir a intervenciones de gestión y políticas que consideren las diferentes formas en que las personas se relacionan con la biodiversidad y los ecosistemas (Martín-López *et al.*, 2019). Un ejemplo, son los bienes obtenidos a través de la agricultura tales como alimentos, fibras, están disponibles gracias a la creciente acción del hombre sobre una serie de funciones y servicios de provisión y soporte ofrecidos por la naturaleza (Daily, 1997; De Groot *et al.*, 2002; MA, 2005). El desafío en la implementación de construcción de capacidades es desarrollar estrategias efectivas para alcanzar y transmitir la información y las habilidades a los diversos grupos de interés de la cuenca, los cuales tienen múltiples y variados objetivos y valores, ya que incluyen desde los proveedores de recursos hasta los usuarios de estos, así como los tomadores de decisiones y reguladores (Martín-López *et al.*, 2012).

49

Valoración económica de los servicios ecosistémicos

EL reconocimiento de la diversidad de valores de la naturaleza y sus contribuciones a la buena calidad de vida de las personas resulta ser difícil, porque se asocia con diferentes culturas, contextos e instituciones (Bronzizio *et al.*, 2009). Por lo tanto, es complicado reconocer que la diversidad de valores de naturaleza y sus contribuciones y son difíciles de comparar en el mismo criterio (Martínez-Alier *et al.*, 1998; Gómez-Baggethun *et al.*, 2016). Los conflictos por los valores frecuentemente afectan la toma de decisiones. La urgencia e importancia de integrar los diversos valores de la naturaleza en nuestras decisiones y acciones de gestión de la tierra se destacan más que nunca. (Sander *et al.*, 2016). La valoración de servicios

ecosistémicos es un tema ampliamente debatido y en constante producción. En México existe poca evidencia empírica de aplicación de metodologías tendientes a dar valor económico a los beneficios asociados a ecosistemas específicos (Galicia y Zarco, 2014). La valoración de la naturaleza y sus servicios se ha convertido en el centro de una cantidad cada vez mayor de literatura científica (Costanza, 2006; Fisher *et al.*, 2009; Skroch y López-Hoffman, 2010; Seppelt *et al.*, 2011). Este desarrollo ha sido estimulado por iniciativas políticas como la Estrategia Europea de Biodiversidad para 2020, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (UICN, 2011) y la (IPBES). Bajo estos auspicios, las evaluaciones y valoraciones de los servicios ecosistémicos nacionales y locales están progresando (Santos-Martín *et al.*, 2014; Jacobs *et al.*, 2016). El concepto de valor, en su amplio sentido de “asignación de importancia” (Boeraeve *et al.*, 2018; Dendoncker *et al.*, 2013). Existen diferentes dimensiones de valor: ecológico, cultural, económico, de interés propio o ético (Martín-López *et al.*, 2011; Van Riper y Kyle, 2014). Aquí, el desafío clave es representar la mayoría de los valores de las diferentes partes interesadas (Albert *et al.*, 2014). Descubrir y obtener estos valores necesariamente requiere la integración de otros enfoques de valoración (Martín-López *et al.*, 2014; IPBES, 2015).

Sin embargo, desde cualquier enfoque metodológico (Daily *et al.*, 2009) se reconoce que para ofrecer un retorno de los SE sobre las inversiones en la naturaleza, la comunidad científica necesita entregar el conocimiento y las herramientas necesarias para pronosticar y cuantificar este retorno, que a diferencia del retorno económico a corto plazo, que se aplica en actividades como la agricultura en especial la de alta productividad sin realizar las previsiones necesarias para mitigar el impacto que la misma causa sobre los servicios ecosistémicos (Wood *et al.*, 2000; Heal y Small 2001). Por lo tanto, la valoración económica ayuda a reconocer la contribución de las funciones del ecosistema que tienen potencial no solo para mejorar los SE en general, sino también para mejorar de manera sostenible la producción de alimentos en los agroecosistemas. A pesar de los avances significativos en la comprensión científica de las consecuencias de la degradación de los diferentes tipos de SE en la agricultura, las políticas actuales a nivel nacional y global continúan ignorando en gran medida el valor de las contribuciones de los SE al logro de la seguridad alimentaria y nutricional (FAO, 2013).

Materiales y métodos

Estudio de caso

Este escrito tiene como referencia un proyecto de investigación elaborado durante la estancia posdoctoral en el centro de Estudios en Geografía Humana del Colegio de Michoacán, en el cual se realizó un acercamiento desde distintos enfoques para analizar la problemática de la valoración de los SE. La escala espacial de estudio de la investigación fue la subcuenca del Río Cupatitzio, localizada en el Poniente del Estado de Michoacán

Localización del área de estudio

La cuenca del río Cupatitzio, pertenece a la Región Hidrológica (Río Balsas), (RH18), se localiza al noroeste del estado de Michoacán, dentro de la sub-región hidrológica Tepalcatepec-Infiernillo (I) (INEGI, 1985; DOF, 2011). Figura 3, abarca los municipios de Uruapan, Gabriel Zamora, F. J. Múgica, Nuevo Parangaricutiro, Parácuaro, Taretan y Ziracuaretiro. La cuenca está ubicada geográficamente entre las coordenadas extremas 18°49'58" y 19°36'11" N y 101°59'30" y 102°13'16" O; con un área de 78 260 ha y una altura media de 1 425 msnm.

En la parte alta y media de la cuenca atraviesa el sistema volcánico transversal de Este a Oeste, donde se encuentran pendientes entre 15% (8.5°), 60% (31°) y barrancas que alcanzan pendientes de 100% (45°). En la parte alta, la cuenca de absorción se delimita con cerros de hasta 3 380 msnm tal es el caso del cerro el Pílon, Capén y la Virgen, en la parte centro; el cerro Burro (2 700 msnm), Cocucho (3 000 msnm) y el Santísimo (3 280 msnm), la cuenca media baja se delimita con los cerros el Chino, la Cruz la Charanda y el Colorado (2 100, 2 300, 2 200 y 2 120 msnm, respectivamente). La cuenca baja tiene una altitud de 320 m y es abierta en dirección sur (Díez-Hernández, 2005).

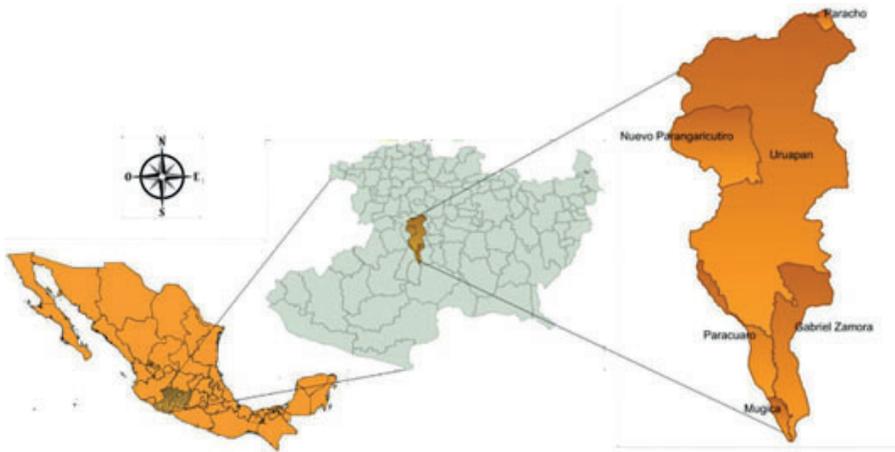


Figura 3. Localización de la subcuenca del Río Cupatitzio. Fuente: CNA.

52 **Delimitación regional ecológica del territorio**

Para el establecimiento del área en estudio para la posterior realización de la síntesis de las unidades del relieve al interior de la cuenca, se consideró como primer paso y como base fundamental del análisis, la delimitación de las unidades morfogénicas a partir de criterios geomorfológicos analíticos. Para la evaluación de los SEH de provisión de agua se analizó la dinámica del uso del suelo y la vegetación en la cuenca mediante la generación de la información cartográfica digital de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:50 000 elaborados para 2022, con base en la interpretación de imágenes de satélite Sentinel 2 de uso del suelo de la cuenca. Se agruparon las categorías según la guía para la interpretación de cartografía de uso del suelo y vegetación de INEGI (2015) y se operaron con uso del programa ArcView 10.8. La disponibilidad de agua superficial y subterránea en la cuenca se estimó a partir del Decreto de disponibilidad del acuífero Cupatitzio (SEMARNAT y CONAGUA, 2020), única fuente disponible debido a que no se cuenta con un estudio geohidrológico regional.

Resultados

Para evidenciar cómo el marco metodológico de los Servicios ecosistémicos contribuye a la educación sobre todo a la aplicación práctica, evalua-

mos la capacidad de infiltración del agua en la zona de estudio, sin menoscabo de otros servicios que proporciona la vegetación aporta muchos beneficios a la sociedad, entre ellos: alimentos: como frutas, hojas, nueces, semillas, hongos, miel, carne de animales silvestres e insectos. Medicinas; la vegetación es una fuente de sustancias que se utilizan para combatir enfermedades producen madera, combustible y fibras, aporta materias primas, regulan la temperatura; capturan el dióxido de carbono y regulan la temperatura, producen oxígeno y purifican el aire, la vegetación puede reducir el ruido del tráfico hasta un 50%. Protegen la biodiversidad la vegetación de los bosques protegen la biodiversidad, los ecosistemas y las formas de vida. Contribuyen a la estabilidad del clima, contribuye a la estabilidad del clima, mantienen el suelo y evita la erosión. Regulan la humedad, favorece la humedad y conduce el agua de las lluvias al suelo, es refugio para la fauna.

Cobertura vegetal y uso de suelo

Se distinguieron 14 tipos de usos de suelo y vegetación obteniendo en cada uno la superficie que ocupan dentro de la subcuenca Cupatitzio; se utilizaron las imágenes SENTINEL 2^a. Para la información obtenida del año 2022, fue por un proceso de clasificación semiautomatizada, para luego mediante la interpretación visual llevar a corrección manual de la clasificación., se obtuvo de observar las diversas tipologías de uso de suelo y cobertura vegetal (Figura 4).

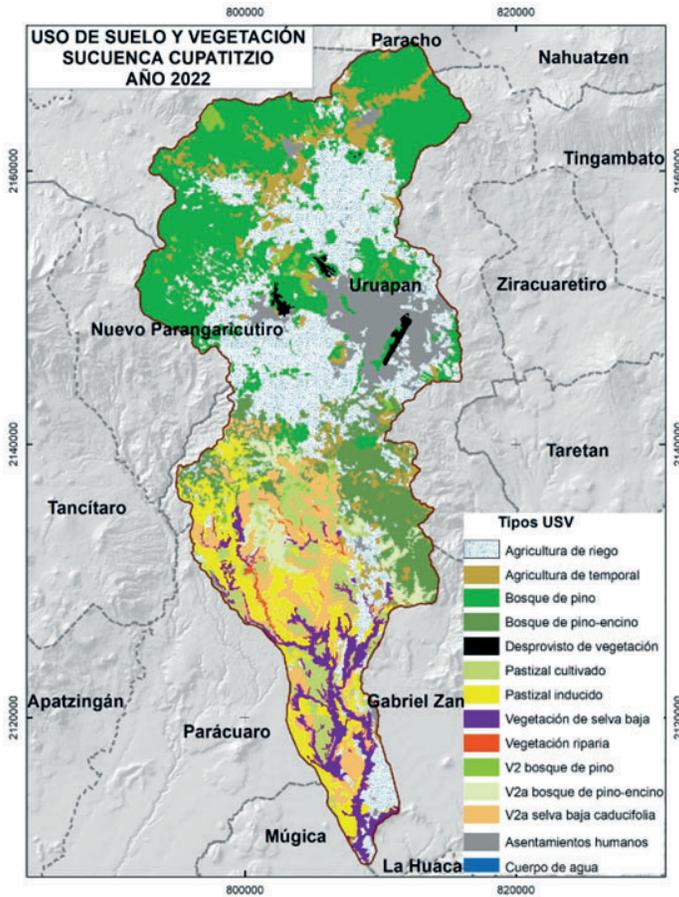


Figura 4. Uso de Suelo y Vegetación 2022, Subcuenca del Río Cupatitzio.
Fuente: Elaboración propia.

Cuantificación de la provisión del servicio ecosistémico de infiltración

Para dar un ejemplo de una cuantificación preliminar de servicios ecosistémicos, se toman datos sobre el balance hídrico para el área de estudio subcuenca del Río Cupatitzio, para 2020 realizado por la CNA. La Tabla 1 muestra los datos respectivos para el volumen total m³/ha por tipo de cobertura.

Tabla 1. Evaluación de los SE de infiltración y Erosión evitada por Cubiertas y usos de suelos en la SCR Cupatitzio

Cobertura y uso de suelo	Clave	Superficie (ha)	Cantidad infiltración m³	Ponderación por cobertura %
Asentamientos humanos	Impermeable	5,163.17	0.00	0.00
Cuerpo de agua	Impermeable	9.22	0.00	0.00
Pastizal inducido	PI	5,253.77	4,896.94	2.15
Pastizal cultivado	PC	4,044.17	7,121.82	4.06
Vegetación secundaria de bosque de pino-encino	V2 BPE	2,068.49	4,153.85	4.62
Agricultura de temporal	AGT	4,868.76	9,845.87	4.66
Vegetación secundaria de selva baja caducifolia	V2 SBC	6,052.77	13,723.54	5.22
Agricultura de riego	AGR	20,622.03	49,197.53	5.49
Vegetación raparúa	VR	168.43	445.43	6.09
Bosque de pino-encino	BPE	6,298.27	17,586.24	6.43
Desprovisto de Vegetación	DV	452.64	2,552.67	12.99
Vegetación de selva baja	SBC	3,397.26	19,810.64	13.43
Bosque de pino	BP	19,271.74	139,297.42	16.65
Vegetación secundaria de bosque de pino	V2 BP	611.75	4,838.41	18.21
Total			273,639.72	100.00

55

Fuente: Elaboración propia

La información generada sobre la oferta potencial de SE, es la capacidad de provisión por tipo de cobertura vegetal y uso de suelo, en el cual pone en evidencia que la cobertura de Pino y sus asociaciones aportan el 45.92% de la infiltración es la que aporta los valores más altos para el SE estudiado (Tabla 3), los pastizales aportan el 6.5%, la cobertura de matorral subtropical contribuye con el 18.65%, vegetación raparúa 6.09% y la agricultura de temporal 4.66%, finalmente la que menos contribuye es la

agricultura de riego con 5.49%. Lo anterior, sugiere las pautas de prioridad en conservación y restauración en su caso. Las coberturas de bosques señalados están a cargo de las comunidades originarias, en nuestro caso particular las comunidades de: San Lorenzo, Capácuaro y San Juan Nuevo. Los resultados nos dan elementos para gestionar de manera justa para las comunidades originarias la producción consumo de servicios ecosistémicos, ya que actualmente la agricultura de alta productividad aguacate y berrees, se desarrolla a costa de la degradación de los ecosistemas naturales.

Discusión

La Educación Ambiental Intercultural, conceptos indisolubles para el desarrollo de los territorios rurales

56

El concepto de servicios ecosistémicos ha enriquecido la educación ambiental al proporcionar un marco que ayuda a entender la interconexión entre los seres humanos y el medio ambiente, como señala el MEA, (2005) Aquí algunas contribuciones clave: Conciencia de interdependencia; Los servicios ecosistémicos destacan cómo los ecosistemas sostienen la vida humana, lo que fomenta una comprensión de la interdependencia entre la salud ambiental y el bienestar humano, evidencias que (MAE 2005 y Balvanera 2012) destacan en su investigaciones. Valoración de la naturaleza: Permite a los estudiantes y comunidades valorar los beneficios que los ecosistemas proporcionan, como la purificación del aire y el agua, la polinización y el control de la erosión. Como lo ha demostrado los trabajos de Costanza (1997) Enfoque en la sostenibilidad: Promueve la importancia de gestionar los recursos naturales de manera sostenible, impulsando prácticas que preserven los ecosistemas para las futuras generaciones. Toma de decisiones informada: Facilita el desarrollo de herramientas y metodologías para evaluar y tomar decisiones sobre el uso de recursos naturales (Flores-Lázaro 2023), integrando aspectos ecológicos, económicos y sociales. Conexiones locales y globales: Ayuda a los diversos actores sociales a entender cómo los problemas ambientales locales están relacionados con cuestiones globales, promoviendo una visión más holística de los desafíos ambientales tal como lo señalan (Barrera-Bassols y Floriani 2018) en sus colaboraciones al tema. En resumen, los servicios ecosistémicos aportan una base conceptual que enriquece la educación ambiental

intercultural, promoviendo una mayor comprensión y responsabilidad hacia el medio ambiente.

Conclusiones

Dada la complejidad del desarrollo sustentable, es necesaria una visión integral las problemáticas relacionadas el conocimiento, con la valoración, los usos y el cuidado del medio ambiente y los servicios ecosistémicos, sin perder de vista que la relación hombre-naturaleza se verá impactada por los referentes socioculturales y del contexto histórico de que se trate.

Es por ello necesario impulsar desde la Educación una conciencia ambiental que promueva desde una perspectiva intercultural, cargada de saberes locales acciones que tengan un mayor impacto en la experiencia directa de los ciudadanos.

El concepto de Servicios Ecosistémicos contribuye a retomar la perspectiva crítica impulsada por la “Epistemología del Sur”, desde donde se revisa el tema ambiental enfocado en reconocer un “saber ambiental emancipador” compuesto por dos elementos los potenciales ecológicos y la creatividad cultural de los territorios del Sur para valorar y aprovechar los recursos de la naturaleza (Leff, 2012).

La Educación Ambiental Intercultural, es un concepto indisoluble para el desarrollo sostenible de los territorios rurales, en particular de las comunidades originarias.

Bibliografía

- A. N. D. R. A. (2007). Servicios ecosistémicos y actores sociales. Aspectos conceptuales y metodológicos para un estudio interdisciplinario. *Gaceta ecológica*, (84-85), 17-26.
- Aceves Quesada, F., Legorreta Paulín, G., & Álvarez Ruíz, Y. (2014). Cartografía geomorfológica para el inventario de procesos gravitacionales en la cuenca endorreica del arroyo La Ciénega, flanco oriental del volcán Nevado de Toluca. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 329-342.
- Arellano Monterrosas, J. L. L., & Ruiz Meza, L. E. (2018). Evaluación y tendencias de los servicios ecosistémicos hidrológicos de la cuenca del río Zanatenco, Chiapas. *Investigaciones geográficas*, (95), 0-0.

- Arsel, M., Hogenboom, B., & Pellegrini, L. (2016). The extractive imperative and the boom in environmental conflicts at the end of the progressive cycle in Latin America. *The Extractive Industries and Society*, 3(4), 877-879. Ash.
- Balvanera, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que proveen los bosques neotropicales. *Ecosistemas* 21(1-2): 136-147.
- Baronnet, Bruno & Merçon, Juliana & Alatorre-Frenk, Gerardo & Klei-
nert, Cristina Victoria & Meseguer Galván, Shantal & Ayora, Gialuan-
na & Escalona-Aguilar, Miguel & Boege, Eckart & Paré, Luisa. (2018).
Educación para la interculturalidad y la sustentabilidad: Aportaciones
reflexivas a la acción.
- Boeraeve, F., Dufrene, M., De Vreese, R., Jacobs, S., Pipart, N., Turkel-
boom, F., ... & Dendoncker, N. (2018). Participatory identification and
selection of ecosystem services. *Ecology and Society*, 23(2).
- Boyd, J., & Banzhaf, S. (2007). What are ecosystem services? The need for
standardized environmental accounting units. *Ecological economics*,
63(2-3), 616-626.
- Braat, L. C., & De Groot, R. (2012). The ecosystem services agenda: bridg-
ing the worlds of natural science and economics, conservation and
development, and public and private policy. *Ecosystem services*, 1(1),
4-15.
- Brundtland, G.H. (1987) *Our Common Future: Report of the World Com-
mission on Environment and Development*. Geneva, UN-Dokument
A/42/427. <http://www.un-documents.net/ocf-ov.htm>
- Carpenter SR., DeFries R, Dietz T, Mooney HA, Polasky S, Reid WV,
Scholes RJ. Millennium ecosystem assessment: research needs. *Sci-
ence* (2006); 314: 257-258.
- Chen, L., Wang, J., Wei, W., Fu, B., & Wu, D. (2010). Effects of landscape
restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau
Region, China. *Forest Ecology and Management*, 259(7), 1291-1298.
- CNA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual del agua en
el acuífero Zamora (1608), Estado de Michoacán. DOF. 20-04-2015.
- Collins, S. L., S. R. Carpenter, S. M. Swinton, D. E. Orenstein, D. L.
Childers, T. L. Gragson, N. B. Grimm, J. M. Grove, S. L. Harlan, J. P.
Kaye, A. K. Knapp, G. P. Kofinas, J. J. Magnuson, W. H. McDowell, J.
M. Melack, L. A. Ogden, G. P. Robertson, M. D. Smith, And A. C. In-
tegrated Science for Society and Environment: A Strategic Research
Initiative, Albuquerque: Long-Term Ecological Research Network, di-

ponible en: http://www.csrc.sr.unh.edu/~lammers/Macroscale-Hydrology/Papers/ISSE_complete_10April.pdf [fecha de consulta: 12 de febrero de 2016]

CONABIO-GIZ. 2017. Conocimiento tradicional asociado a los recursos biológicos. Cuaderno de divulgación 1. Proyecto Gobernanza de la Biodiversidad: Participación justa y equitativa de los beneficios que se deriven del uso y manejo de la diversidad biológica, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)-Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable en México (GIZ). Ciudad de México. México.

Costanza, R. et al. (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387 (6630); 253–260.

Cristeche, E., & Penna, J. A. (2008). Métodos de valoración económica de los servicios ambientales. *Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales*, 3, 1-55.

Crossman, N. D., Burkhard, B., Nedkov, S., Willemsen, L., Petz, K., Palomo, I., ... & Alkemade, R. (2013). A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. *Ecosystem services*, 4, 4-14.

Daily, G.C., ed. (1997), *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Washington DC (Island Press).

De Groot, R.S., Fisher, B., Christie, M., Aronson, J., Braat, L.R., Haines-Young, Gowdy, J., Maltby, E., Neuville, A., Polasky, S., Portela, R., Ring, I., (2010). Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. In: Kumar, P. (Ed.), *TEEB Foundations, The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. Earthscan, London.

Díaz, S., Demissew, S., Carabias, J., Joly, C., Lonsdale, M., Ash, N., ... & Bartuska, A. (2015). The IPBES Conceptual Framework—connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 1-16.

Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R. T., Molnár, Z., ... & Polasky, S. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359(6373), 270-272.

Dominati, E., M. Patterson, and A. Mackay. (2010). “A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils”. *Ecological Economics* 69(9):1858–1868.

Egoh, B., Drakou, E. G., Dunbar, M. B., Maes, J., & Willemsen, L. (2012). Indicators for mapping ecosystem services: a review (p. 111). *European*

Commission, Joint Research Centre (JRC).

- Ehrlich, P. R., Kareiva, P. M., & Daily, G. C. (2012). Securing natural capital and expanding equity to rescale civilization. *Nature*, 486(7401), 68-73.
- Elkington, J. (1994) Towards the Sustainable Corporation: Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development. *California Management Review*, 36, 90-100. <http://dx.doi.org/10.2307/41165746>
- Estrada-Godoy, F. Silva, J.T., Ochoa, S., Moncayo-Estrada, R., Cruz-Cárdenas, G., Villalpando, F., Ramos, A. y Nava, J., (2013). Aplicación del Método SINTACS para la determinación de la vulnerabilidad acuífera en la Cuenca del Río Duero, Michoacán, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 29: 235-248.
- FIRA (2016) Informe Anual (2016). Banco de México. Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura. Dirección General.
- Fisher, B., & Turner, R. K. (2008). Ecosystem services: classification for valuation. *Biological conservation*, 141(5), 1167-1169.
- 60 Fisher, B., Turner, RK and Morling, P. (2009). Definition and classification of ecosystem services for decision making. *Ecological economy*, 68 (3), 643-653.
- Freeman III, A. M., Herriges, J. A., & Kling, C. L. (2014). The measurement of environmental and resource values: theory and methods. Routledge.
- Gobster, P. H., Nassauer, J. I., Daniel, T. C., & Fry, G. (2007). The shared landscape: What does aesthetics have to do with ecology? *Landscape Ecology*, 22(7), 959-972. <http://dx.doi.org/10.1007/s10980-007-9110-x>
- Guerry, A. D., Polasky, S., Lubchenco, J., Chaplin-Kramer, R., Daily, G. C., Griffin, R., ... & Feldman, M. W. (2015). Natural capital and ecosystem services informing decisions: From promise to practice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(24), 7348-7355.
- Haines-Young, R., & Potschin, M. (2010). The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. *Ecosystem Ecology: a new synthesis*, 1, 110-139.
- Hedden-Dunkhorst, B., Braat, L., & Wittmer, H. (2015). TEEB emerging at the country level: Challenges and opportunities. *Ecosystem Services*, 14, 37-44.
- Hediger, W. (1999), "Reconciling "weak" and "strong" sustainability", *International Journal of Social Economics*, Vol. 26 No. 7/8/9, pp. 1120-1144. <https://doi.org/10.1108/03068299910245859>.

- Howe, C., Suich, H., Vira, B., & Mace, G. M. (2014). Creating win-wins from trade-offs? Ecosystem services for human well-being: a meta-analysis of ecosystem service trade-offs and synergies in the real world. *Global Environmental Change*, 28, 263-275. <http://www.ambienteycomercio.org/que-estudia-la-economiaambiental-y-cual-es-su-diferencia-con-la-economia-ecologica/>
- Inegi, C. (2011). Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica 2009: Panorama sociodemográfico de México: Principales resultados 2011. México: Inegi/Conapo
- IPBES (2019): Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 1148 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>.
- J. (2017). Mainstreaming investments in watershed services to enhance water security: Barriers and opportunities. *Environmental Science & Policy*, 75, 19-27.
- Jacobs, S., Dendoncker, N. and Keune, H. (Eds.). (2013). *Ecosystem services: global issues, local practices*. Elsevier
- Jiménez, O. F., & Negri, L. B. (2019). Experiencias y contribuciones del CATIE al manejo y gestión de cuencas hidrográficas en América tropical. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(1), 153-170.
- Jujnovsky, J., Almeida-Leñero, L., Bojorge-García, M., Monges, Y. L., Cantoral-Uriza, E., & Mazari-Hiriart, M. (2010). Hydrologic ecosystem services: water quality and quantity in the Magdalena River, Mexico City. *Hidrobiológica*, 20(2), 113-126.
- La Notte, A., D'Amato, D., Mäkinen, H., Paracchini, M. L., Liqueste, C., Egoh, B., ... & Crossman, N. D. (2017). Ecosystem services classification: A systems ecology perspective of the cascade framework. *Ecological Indicators*, 74, 392-402.
- Lara, A., Little, C., Urrutia, R., McPhee, J., Álvarez-Garretón, C., Oyarzún, C., ... & Arismendi, I. (2009). Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest Ecology and Management*, 258(4), 415-424.
- Le, Q. B., Nkonya, E., & Mirzabaev, A. (2014). Biomass productivity-based mapping of global land degradation hotspots. ZEF-Discussion Papers on Development Policy, (193). ZEF, University of Bonn, Bonn, Germany.

- Leff, E., (2012). Pensamiento Ambiental Latinoamericano: Patrimonio de un saber para la sustentabilidad. *Environ. Ethics* 34, 97-112. DOI: <https://doi.org/10.5840/enviroethics201234Supplement58>.
- Levers, C., & Müller, D. (2019). Mapping Export-Oriented Crop Production. In *Telecoupling* (pp. 89-113).
- López Blanco, (1994). Evaluaciones geomorfológicas y de recursos naturales aplicando un sistema de información geográfica (ILWIS), Tesis de Doctorado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, D. F. pp 125-155.
- López-Blanco, J. y L. Villers-Ruíz, (1994). Delimitación de unidades ambientales biofísicas con fines de ordenamiento territorial aplicando un enfoque geomorfológico y SIG.: Estudio de caso en Los Cabos Baja California Sur, Memoria de Resúmenes de la Tercera Reunión de Geomorfología. Guadalajara, Jal. 96-99. study in Beijing-Tianjian-Hebei region, China.” *Ecological Indicators* 81 (2017): 159-170.
- Marcote Vega, V., Freitas, M., Álvarez, P., y Fleuri R. (2007) marco teórico y metodológico de educación ambiental e intercultural para un desarrollo sostenible. *Eureka. Enseñ. Divul. Cien.*, 4(3), pp. 539-554
- Martín-López, B., García-Llorente, M., Palomo, I., & Montes, C. (2011). The conservation against development paradigm in protected areas: Valuation of ecosystem services in the Doñana social-ecological system (southwestern Spain). *Ecological Economics*, 70(8), 1481-1491
- MEA (2003), *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment*, Millennium Ecosystem Assessment Series, Washington, DC (Island Press).
- MEA, (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*. Island Press, Washington, DC.
- Molina, J. R., y Silva, F. R., & Herrera, M. Á. (2016). Integrating economic landscape valuation into Mediterranean territorial planning. *Environmental Science & Policy*, 56, 120-128.
- Montana, J., & Borie, M. (2016). IPBES and biodiversity expertise: Regional, gender, and disciplinary balance in the composition of the interim and 2015 multidisciplinary expert panel. *Conservation Letters*, 9(2), 138-142.
- Odina, M. T. A., & María, T. (1991). La educación intercultural: concepto, paradigmas, realizaciones. *Lecturas de pedagogía diferencial*. Dykinson, Madrid.
- Orenstein, D. (2013). More than language is needed in valuing ecosystem

- services. *Bioscience*, 63(12), 913-913.
- Pandeya, B., Buytaert, W., Zulkafli, Z., Karpouzoglou, T., Mao, F., & Hannah, D. M. (2016). A comparative analysis of ecosystem services valuation approaches for application at the local scale and in data scarce regions. *Ecosystem Services*, 22, 250-259.
- Pearce, D., Özdemiroglu, E., & Britain, G. (2002). Economic valuation with stated preference techniques: Summary guide (p. 24). London: Department for Transport, Local Government and the Regions.
- Plieninger, T., Dijks, S., Oteros-Rozas, E., & Bieling, C. (2013). Assessing, mapping, and quantifying cultural ecosystem services at community level. *Land use policy*, 33, 118-129.
- Potschin, M., & Haines-Young, R. (2016). Defining and measuring ecosystem services. Potschin, M., Haines-Young, R., Fish, R., Turner, R.K. (Eds.), *Routledge Handbook of Ecosystem Services*. Routledge, London and New York, 25-44.
- Quétier, F. A. B. I. E. N., Tapella, E., Conti, G., CáCERES, D. A. N. I. E. L., & DÍAZ, S.
- Robinson, D. A., N. Hockley, D. M. Cooper, B. A. Emmett, A. M. Keith, I. Lebron, B. Reynolds, E. Tipping, A. M. Tye, C. W. Watts, W. R. Whalley, H. I. J. Black, G. P. Warren, and J.S. Robinson. 2013. "Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation". *Soil Biology and Biochemistry* 57:1023–1033.
- Rounsevell, M.D.A., Dawson, T.P. and Harrison, P.A. (2010), "A conceptual framework to assess the effects of environmental change on ecosystem services", *Biodiversity and Conservation*, 19 (10): 2823–2842.
- Sachs, J. D., & Reid, W. V. (2006). Investments toward sustainable development. *Science*, 312(5776), 1002-1002.
- Sandhu, H., & Wratten, S. (2013). Ecosystem services in farmland and cities. *Ecosystem services in agricultural and urban landscapes*, 3-15.
- SEEA, U. (2003). United Nations Statistics Division—Environmental Accounting. Seghezze, L., Volante, J. N., Paruelo, J. M., Somma, D. J., Buliubasich, E. C., Rodríguez.
- Seppelt, R., Dormann, C. F., Eppink, F. V., Lautenbach, S., & Schmidt, S. (2011). A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, shortcomings and the road ahead. *Journal of applied Ecology*, 48(3), 630-636.
- Silva García, J. T., Ochoa Estrada, S., Cruz Cárdenas, G., Nava Velázquez, J., & Villalpando Barragán, F. (2016). Manantiales de la cuenca del río

- Duero Michoacán: operación, calidad y cantidad. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32 (1), 55-68.
- Sitas, N., Prozesky, H. E., Esler, K. J., & Reyers, B. (2014). Opportunities and challenges for mainstreaming ecosystem services in development planning: perspectives from a landscape level. *Landscape ecology*, 29(8), 1315-1331.
- Sosa-Rodríguez, F. S. (2015). Política del cambio climático en México: avances, obstáculos y retos. *Revista Realidad, Datos y Espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 6(2), 4-23.
- Svampa, M., 2015. Commodities consensus: Neoextractivism and enclosure of the commons in Latin America. *South Atlantic Quarterly* 114 (1), 65-82.
- TEEB, E. (2008). The economics of ecosystems and biodiversity. EEA 2 (teebweb.org)
- Velázquez, M. M. A.; Seefoó, L. J. L. y Flores, L. N. (2008). Impacto socioeconómico de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del Río Duero y su importancia en la producción de fresa. CONAFRE, A. C. SAGARPA. Zamora, Michoacán. 72-88 pp.
- Verstappen, H. T. (1988). Old and new observations on coastal changes of Jakarta Bay: an example of trends in urban stress on coastal environments. *Journal of coastal research*, 573-587.
- Verstappen, H. TH y Van Zuidam, R.A. 1991 El Sistema ITC para Levantamientos Geomorfológicos. Publicación ITC, No. 10. ITC, Holanda. 41 pp.
- Villanueva, A., Fagandini, F., & Bazile, D. (2015). Aportes de la economía ambiental para la planificación territorial. Caso de estudio comuna de Quilpué, Chile. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Vogl, A. L., Goldstein, J. H., Daily, G. C., Vira, B., Bremer, L., McDonald, R. I., ... & Cassin,
- Wallace, K. J. (2007). Classification of ecosystem services: problems and solutions. *Biological conservation*, 139(3-4), 235-246.
- Warziniack, T., Sham, C.H., Morgan, R., Feferholtz, Y., 2017. Effect of forest cover on water treatment costs. *Water Econ. Policy* 03, 1750006.
- Zhang, M., Liu, N., Harper, R., Li, Q., Liu, K., Wei, X., Liu, S. (2017). A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime. *Journal of Hydrology*., 546, 44-59. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.040>.

Zurrita, A. A., Badii, M. H., Guillen, A., Serrato, O. L., & Garnica, J. A. (2015). Factores Causantes de Degradación Ambiental (Factors Causing Environmental Degradation). *Daena: International Journal of Good Conscience*, 10(3), 1-9.

UNA COMUNIDAD MICHOACANA ANTE “EL AÑO DEL HAMBRE”. SANTA FE DEL RÍO, 1785-1786. SUS EFECTOS Y EL MEDIO AMBIENTE

Isla Citlalli Jiménez Pérez

Colegio de Michoacán A.C. Martínez de Navarrete 505 Col. Las Fuentes C.P.
59699 Zamora Michoacán, México Email: citlalli_jimenez94@hotmail.com

Resumen

Este capítulo tiene como objetivo mostrar la dinámica demográfica en el pueblo de Santa Fe del Río de 1778 a 1790. En esta temporalidad ocurrió un evento que tiene incidencia directa en la demografía: el “año del hambre” a fines de 1785 y en 1786. Esta se trató de una crisis de subsistencia que afectó particularmente a la región donde está ubicada esta localidad. Así, se estudiará si este evento tuvo un influjo en Santa Fe del Río y en su población. De este modo, se demuestra cómo este pueblo no vivió efectos tan severos con este acontecimiento debido, en parte, a los recursos del medio ambiente de lo que podía disponer.

Palabras clave: Hambrunas, Nueva España, población, Santa Fe del Río, siglo XVIII.

Introducción

El medio ambiente siempre ha rodeado al ser humano. Su relación ha definido varias cuestiones del devenir social y cultural. Esto se podrá ver en este estudio que corresponde a un momento preciso de la segunda mitad del siglo XVIII en la Nueva España, cuando una parte importante de ella fue afectada por el “año del hambre”. Los efectos, según varios estudios, fueron devastadores, ya que, a la par que se perdían las cosechas, hubo varias epidemias que menguaron algunas poblaciones.

Asimismo, se ha referido que la zona del Bajío fue una de las que vivieron los estragos más serios de estos acontecimientos; con la intención de comprobar que tan adverso fue para esta región el “año del hambre”, elegí al pueblo-hospital de Santa Fe del Río como “botón de muestra” para ver

cómo este pueblo de indios enfrentó esta situación y conocer su relación con su entorno físico.

Para esto, recurrí a las fuentes históricas, concretamente, a las partidas de bautizo y de entierro de la parroquia del lugar que me permitieran conocer la dinámica demográfica de esta localidad antes, durante y después de esta contingencia para saber la afectación a la población que se demostraría en menos nacimientos y más muertes. Así, a pesar de la distancia que parece estar entre el presente y la época colonial, planteo que, con la metodología adecuada, podemos acercarnos a conocer cómo encaraban las personas de ese tiempo algunas crisis y cómo utilizaban los recursos del medio ambiente que los rodeaba para sobrevivir.

A la sombra de Vasco de Quiroga. Breve contexto histórico de Santa Fe del Río

68

Santa Fe del Río fue fundado en algún momento del siglo XVI, que hasta la fecha no se puede precisar, en la ribera del Grande, hoy conocido como Lerma, como pueblo-hospital. Respecto a su origen fundacional hay en la historiografía cierto debate que nos lleva a la figura del primer obispo de Michoacán, Vasco de Quiroga (1536-1565), quien previamente se desempeñó como oidor de la Segunda Audiencia de México (1531-1536). En esta etapa, Quiroga fundó el pueblo de Santa Fe de los Altos, en 1532, que pertenecía al arzobispado de México, y el de la Laguna, en 1534, que formaba parte de la jurisdicción de Tzintzuntzan, en el obispado de Michoacán. Marta Terán menciona brevemente en su trabajo que Santa Fe del Río fue fundado muchos años después que estos dos pueblos, por Alonso de la Mota y Escobar, sin precisar un año exacto (Terán, 2003).

En este sentido, hay varias posturas en torno al origen de nuestro pueblo; algunas fuentes refieren que esta se dio posterior a la muerte del obispo Quiroga, mientras que otros afirman que sí fue fundado por este personaje. Por estas discrepancias y al no estar aclarado hasta la fecha este punto, Santa Fe del Río no figura en algunas obras que han tratado este tipo de temáticas (Ramírez, 1990).

Sin embargo, sea cual sea esta situación -la cual merecería, sin duda, un estudio aparte-, sí hay evidencias concretas de que Santa Fe funcionó como un pueblo-hospital en la época colonial tal como sus homónimos de México y Tzintzuntzan, ya que dependía administrativamente del cabildo catedral de Valladolid, no del obispo, tal como Vasco de Quiroga lo había

estipulado, y tenía un cura-rector que también era elegido por el senado del mitrado, por lo que el pueblo era también considerado un curato-recorado. En cuanto a la organización política, se gobernaba localmente por regidores que se elegían cada cierto tiempo (Ramírez, 1990).

Los objetivos de estas fundaciones era cuidar del necesitado, introducir a los nativos en un modo “civilizado” de vida e instruirlos en la fe católica (Warren, 2015). Esta fue la génesis que dio forma a los pueblos-hospitales de Santa Fe, como un mecanismo que subsanara los problemas que veía Quiroga en los indios: la pobreza, la falta de congregación en un lugar fijo, darles pronto auxilio y administración de pasto espiritual.¹ Para esto, el primer obispo de Michoacán, se basó en obra titulada *Utopía* de Tomás Moro, para proponer un modelo de vida basado en la “simpleza” y “pureza de corazón” de los indios para construir una sociedad mejor, alejada de lo que adolecía la europea, lo cual tendría lugar en dichos pueblos (Zavala, 1941).

En este sentido, la organización interna que debían tener estos pueblos-hospitales de Santa Fe quedó asentada en las *Ordenanzas* escritas por Vasco de Quiroga y que fueron publicadas entre 1554 y 1556. En ellas se plantea que la actividad principal en la que todos sus habitantes deberían emplearse era la agricultura en las tierras del pueblo, este trabajo se haría durante seis horas diarias por familia y se repartiría el usufructo entre todos para “que ninguno padezca en el hospital necesidad”. El concepto de familia incluía a los abuelos, padres, hijos, nietos y bisnietos, quienes podrían habitar en una misma casa.

Para salir del pueblo, los indios de los pueblos de Santa Fe tenían que tener licencia del cura-rector y los regidores. También se ordenaba que los padres de familia buscaran casar a sus hijos e hijas con personas del hospital o de la misma comarca. Vasco de Quiroga se muestra preocupado por los años de carestía, por lo que ordena que en cada año se siembre en el pueblo el doble de lo que se necesite, para almacenarlo y después distribuirlo entre la población.

Al ser pueblo-hospital, se menciona que para los enfermos habría una “[...] enfermería grande cuadrada, dos veces mayor que las otras de los sanos y algo apartada de ellas, en que en él un cuadro haya una sala grande para los enfermos de males contagiosos, y otra enfrente de ella para los de

1 En este texto se usa el término “indio” para referirse a los habitantes nativos tal como se hacía en los documentos coloniales.

enfermedades no contagiosas [...]”. En el hospital habría boticario, médico y cirujano que atenderían a los enfermos, los cuales serían visitados por los sanos, “guardándose de los contagios, que no se les pegue el mal” (Warren, 2015).

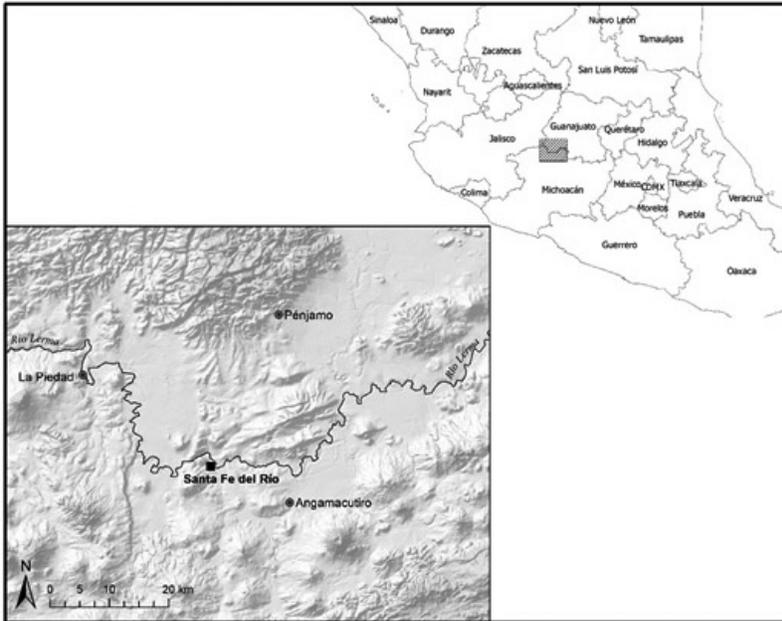
De este modo, queda claro que el pueblo de Santa Fe del Río fue fundado para congregar a la población india. Por esta razón, algunos estudios señalan que los indios de estos pueblos se mezclaron menos con otras calidades², ya que “[...] no era posible avecindarse en los rectorados de Santa Fe si no se era indio” (Terán, 2003), lo que no era tan preciso, ya que, para la segunda mitad del siglo XVIII, la parroquia de Santa Fe del Río, estaba compuesta mayoritariamente por indios hablantes de lengua tarasca y otomí (Mazín, 1987), pero también había personas de otras calidades, como mulatos, españoles, mestizos, coyotes, moriscos y lobos. Los españoles y mulatos merecen una mención especial ya que, en los años estudiados, son la segunda y tercera calidad en número después de los indios (González, 1980).

70

La zona en donde está fundado nuestro pueblo de estudio es el Bajío, al cual se le conoció en la segunda mitad del siglo XVIII como “el granero de la Nueva España” debido a la excelente calidad de sus tierras, por lo que la agricultura era una actividad muy importante en la región, como hasta hoy en día (Rodríguez, 2002). Para esto, además de aprovechar lo benigno de su suelo, los habitantes de Santa Fe también se valían del clima templado y de estar asentados a orillas del río Grande, lo que les daba acceso a agua todo el año. De este modo, Santa Fe era una comunidad con un arraigo importante a la tierra, por su ubicación geográfica y por lo que Vasco de Quiroga estipuló en las *Ordenanzas*.

2 En la historiografía se ha convenido que calidad es el término más apropiado para hablar de “indios”, “mulatos”, “criollos”, etcétera.

Mapa 1. Localización de Santa Fe del Río



Fuente: Elaboración propia con asesoría del Lic. Marco Antonio Hernández Andrade.

Hablando de cuestiones demográficas, respecto a la población india, algunos estudios observan que, para la segunda mitad del siglo XVIII, hay un decaimiento de esta en algunos puntos del obispado de Michoacán, derivado del mestizaje y las epidemias (Morin, 1979). Para Claude Morin, en el Bajío michoacano en esa temporalidad, “[...] las zonas rurales progresan a mayor velocidad hasta 1785, año en que el movimiento parece invertirse casi en todas partes en favor de los poblados [...] En la misma época la población de los pueblos indígenas parece desplazarse hasta la ciudad o hacia la cabecera” (Morin, 1979).

En esta tónica, en Santa Fe del Río, según el mismo autor, la población india crece, pero decrece al mismo tiempo en relación con la población total, ya que en 1760 un 49% de los habitantes del pueblo eran indios y para 1809 habían llegado al 42% (Morin, 1979). Esto puede ser matizado con diversos factores, como el registro de las calidades que hacían los párrocos

y las migraciones.

Para David Brading, en el siglo XVIII en el Bajío se incrementó la población en comparación con la de la Nueva España, de 156,140 personas en 1742 a 397,924 en 1792. En añadidura, "la combinación de un alto grado de urbanización con una rápida expansión demográfica provocó una transformación masiva en el campo" (Brading, 1973).

Este es el contexto dónde se centrará este estudio demográfico en la segunda mitad la centuria dieciochesca; este fue un periodo que se caracterizó por la aparición de múltiples epidemias que impactaron de diferente manera e intensidad a las poblaciones novohispanas. En concreto, me enfocaré en analizar una posible sobremortalidad debido a la crisis de subsistencia que se dio en la Nueva España, conocida como el "año del hambre" de 1785 y 1786. Esto se hará a través del análisis de las partidas de los bautizos y los registros de las defunciones de la parroquia de Santa María de la Asunción de Santa Fe del Río, a las cuales tuve acceso gracias a la plataforma Family Search³; sin embargo, los registros de entierros únicamente abarcan de 1784 a 1789, mientras que los de bautizos van de 1778 a 1790. También es importante señalar que el método que he utilizado en mi análisis es el agregativo.

72

Dinámica demográfica general en Santa Fe del Río de 1778 a 1790

A continuación, se dará un breve panorama de la dinámica demográfica de la parroquia de Santa María de la Asunción de Santa Fe del Río en doce años que van de 1778 a 1790. En primer lugar, es importante señalar que, a través de este estudio, se pudo ver que a esta parroquia recurren pobladores de distintas localidades a bautizar a los recién nacidos o a dar cristiana sepultura a sus muertos, lo cual nos revela el relevante papel que jugaba esta parroquia en la dinámica regional, atrayendo a personas de diferentes pueblos, haciendas y jurisdicciones.⁴

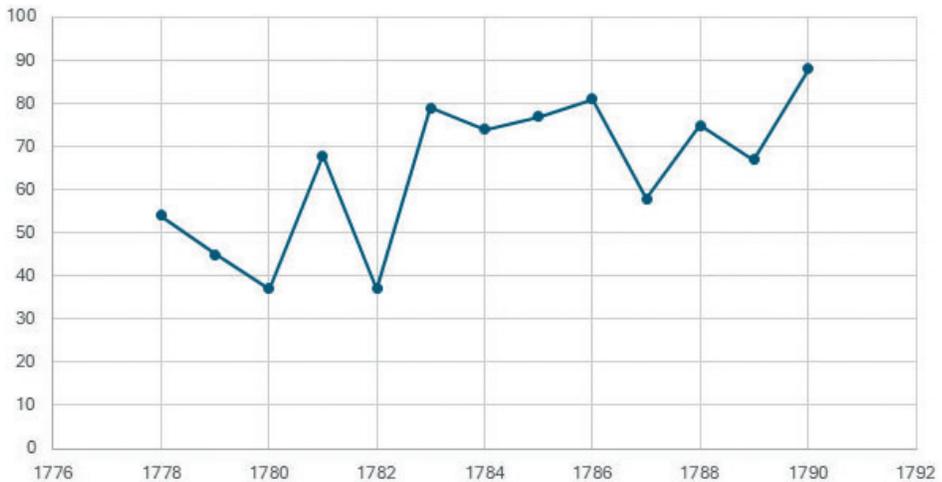
Los bautizos de estos doce años son los registros más completos que

3 Estas fuentes históricas son las más empleadas para ver el impacto de cuestiones ambientales o de epidemias en alguna población, ya que permiten ver los nacimientos y los decesos en años concretos.

4 Entre estos destacan las haciendas de Guándaro, Cuiricipo, La Palma, Epeja, y poblaciones pertenecientes a diferentes jurisdicciones como Pénjamo, Tlazalca, San Francisco Angamacutiro y La Piedad.

poseemos. A partir de ahí se puede observar una evolución demográfica de los nacimientos, con una tendencia a la baja desde 1778, llegando a su punto más bajo en 1780. Después hay una recuperación, pero en 1782 se vuelve a caer igualando la cifra de dos años anteriores. Luego la tendencia se sostiene hasta 1787 donde comienza, de nuevo, un ritmo irregular. Es decir, sí vemos una tendencia al alza en la población de Santa Fe, pero no es sostenida.

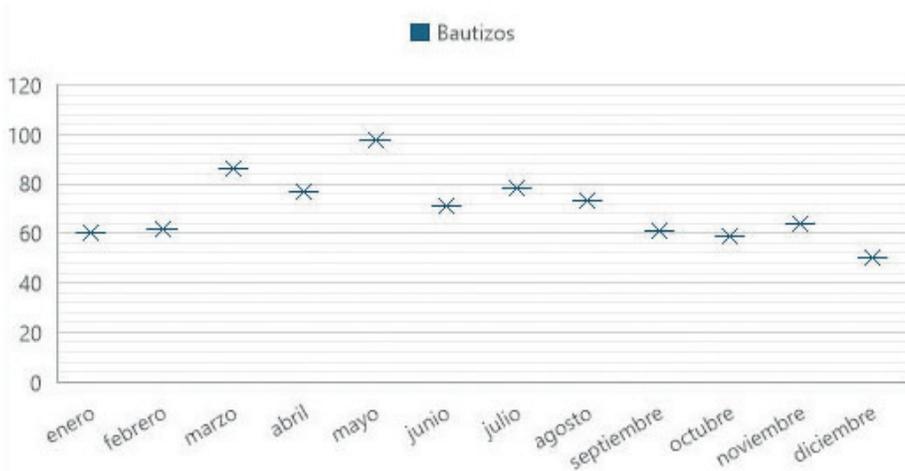
Gráfica 1. Evolución demográfica anual de nacimientos de Santa Fe del Río



Fuente: Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Bautismos 1775-1817, consultado en: “Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996”, database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-B59Z-Y4?wc=3NY1-168%3A179077001%2C178662802%2C179081801&cc=1883388>), imágenes 25 a 166.

La mayoría de estos niños nacieron entre marzo y mayo, en la temporada de la siembra del calendario agrícola. De estos, la mayor parte se concibió entre junio y agosto, en la época de las lluvias de temporal, teniendo su pico más alto en el octavo mes del año, que es cuando en Santa Fe comienzan con más intensidad las lluvias que alimentan las parcelas.

Gráfica 2. Análisis estacional de nacimientos de Santa Fe del Río

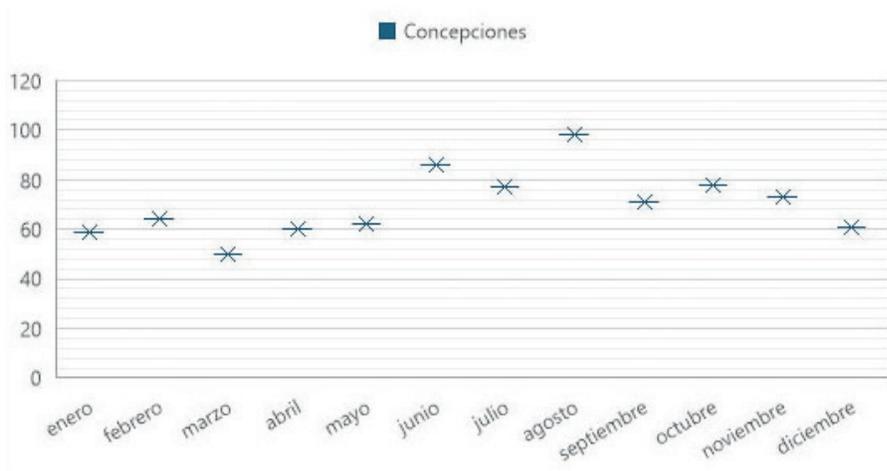


74

Fuente: Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Bautismos 1775-1817, consultado en: "Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996", database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-B59Z-Y4?wc=3NY1-168%3A179077001%2C178662802%2C179081801&cc=1883388>), imágenes 25 a 166.

También se puede observar que se concebía menos en Semana Santa (que regularmente es en marzo) que en diciembre. Al mismo tiempo, las bajas concepciones en el mes de marzo se podrían asociar también a que era en ese mes cuando comenzaba el trabajo del campo en el que, según lo ordenado por Vasco de Quiroga, trabajaban todas las familias de Santa Fe del Río. De este modo, se puede observar que, a pesar del arraigo a la tierra, la mayoría de las concepciones se hicieron un poco antes de la cosecha.

Gráfica 3. Análisis estacional de nacimientos de Santa Fe del Río



Fuente: Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Bautismos 1775-1817, consultado en: “Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996”, database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-B59Z-Y4?wc=3NY1-168%3A179077001%2C178662802%2C179081801&cc=1883388>), imágenes 25 a 166.

75

En esta temporalidad nacieron 432 hombres y 408 mujeres, y la gran mayoría eran indios oriundos de Santa Fe, seguido por los mulatos y españoles.⁵

⁵ Como ya mencioné, a la parroquia de Santa María de la Asunción de Santa Fe del Río acudían personas de diferentes lugares cercanos. En este sentido, este análisis arroja que, para este momento, la mayoría de los mulatos bautizados eran originarios del pueblo cercano de Patámbaro, mientras que, en los entierros, los mulatos de Santa Fe aparecen con mayor frecuencia. Las dos mulatas esclavas bautizadas también son de Patámbaro. En este último punto hay que considerar el subregistro y lo incompleto de la información de los entierros. En el caso de los españoles, la mayoría de los bautizados y difuntos sí eran residentes de Santa Fe. También, en mis registros separé a los mulatos de los mulatos libres, tratando de respetar cómo los consigna el párroco, sin embargo, en la afirmación que hago que la calidad que seguía en número eran los mulatos, ahí sumo estas dos categorías que dan un total de 203.

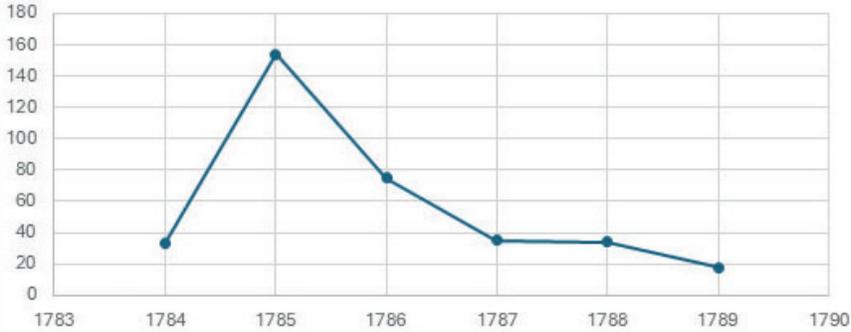
Tabla 1. Calidad en los bautizos de Santa Fe del Río

Español/a	151	Mestizo/a	66
Coyote/a	4	Morisco/a	7
Indio/a	342	Mulato/a	148
Indio/a laborío/a	31	Mulato/a libre	55
Indio lobo	1	Mulata esclava	2
Lobo/a	22	Sin especificar	11

Fuente: Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Bautismos 1775-1817, consultado en: "Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996", database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-B59Z-Y4?wc=3NY1-168%3A179077001%2C178662802%2C179081801&cc=1883388>), imágenes 25 a 166.

76 En cuanto a los entierros, se tienen menos datos y más sesgados, ya que únicamente se tuvo acceso a seis años y en algunos de ellos hay subregistro, como en 1784, 1787, 1788 y 1789, ya que se registraron muy pocas muertes y se omiten algunos meses. Sin embargo, con la información que consultamos, pudimos notar que, en Santa Fe del Río, hay una marcada sobremortalidad en 1785, lo que no se volverá a ver en estos años; esta alta cifra de defunciones bajará hasta 1787.

Gráfica 4. Evolución demográfica de los entierros de Santa Fe del Río



Fuente: Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Defunciones 1784-1824, consultado en: “Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996”, database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-1HSH-LH?wc=3NBC-HZ3%3A179077001%2C178662802%2C179296701&cc=1883388>), imágenes 6 a 49.

77

En este periodo de seis años, murieron más hombres que mujeres, los primeros con 190 decesos y las últimas con 159. Mientras tanto, el sector que más moría por edad eran los párvulos⁶, lo que demuestra la gran mortalidad infantil de la época colonial. En este caso analizado, los párvulos se asientan hasta los 7 años de edad, que era cuando hacían la primera comunión. A partir de ahí ya eran considerados adultos.

Tabla 2. Edad en los entierros de Santa Fe del Río

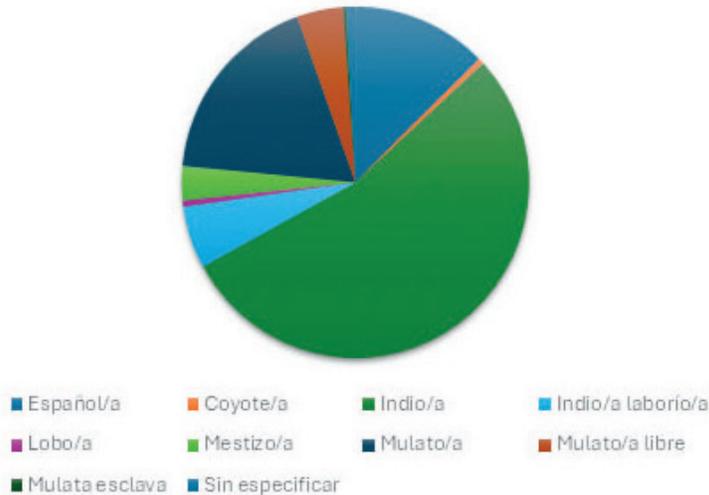
Párvulo/a	216
Adulto/a	133

Fuente: Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Defunciones 1784-1824, consultado en: “Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996”, database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-1HSH-LH?wc=3NBC-HZ3%3A179077001%2C178662802%2C179296701&cc=1883388>), imágenes 6 a 49.

6 Así se le llamaba en la época a los niños.

El análisis por calidad arroja que quienes tenían más decesos eran los indios, con 188 entierros, seguido por los mulatos con 63 y los españoles con 44. En cuanto al lugar de origen, la mayoría de los fallecidos eran originarios de Santa Fe.

Gráfica 5. Calidad en los entierros de Santa Fe del Río

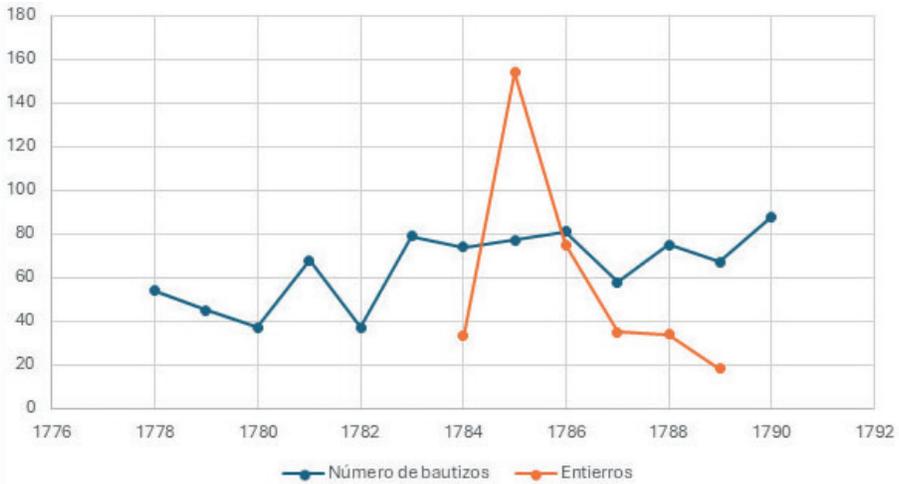


78

Fuente: Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Defunciones 1784-1824, consultado en: "Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996", database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-1HSH-LH?wc=3NBC-HZ3%3A179077001%2C178662802%2C179296701&cc=1883388>), imágenes 6 a 49.

Para concluir este apartado, se incluye una gráfica donde se comparan los bautizos y entierros en la parroquia de Santa Fe del Río, donde se observa la dinámica demográfica que sigue esta población abajeña en un momento caracterizado por eventos diversos que incidieron en la demografía.

Gráfica 6. Nacimientos y entierros de Santa Fe del Río



Fuentes: Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Bautismos 1775-1817, consultado en: “Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996”, database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-B59Z-Y4?wc=3NY1-168%3A179077001%2C178662802%2C179081801&cc=1883388>), imágenes 25 a 166.

Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Defunciones 1784-1824, consultado en: “Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996”, database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-1HSH-LH?wc=3NBC-HZ3%3A179077001%2C178662802%2C179296701&cc=1883388>), imágenes 6 a 49.

El “año del hambre” de 1785 y 1786

En 1785 al obispado de Michoacán, jurisdicción de Santa Fe del Río, le tocó enfrentar una aguda crisis agrícola (Ugarte, 1963) que afectó también a otras regiones de la Nueva España, como el centro, el occidente y el norte; esta es considerada como la más severa y que causó mayores afectaciones en la población a lo largo del periodo colonial (Del Villar, 1997). Su origen tiene que ver con que desde 1784 las lluvias habían sido escasas, lo que en su momento no representó mayor problema, ya que fue el cuarto año de cosechas abundantes. Ya en 1785 las lluvias se retrasaron hasta julio y agosto, pero aún la provisión de granos se consideraba suficiente.

El panorama se agravó partir de septiembre de ese año ya que hubo intensas heladas que terminaron con los cultivos, lo que generó desabasto y carestía, además de un alza inmediata de los precios de los granos (Galué, 1973). Al mismo tiempo, esto ocasionó hambrunas, enfermedades y altos índices de mortandad (Del Villar, 1997). Al año siguiente esta crisis continuó hasta mediados de año cuando se echaron a andar proyectos de siembras extraordinarias. A esto se le ha llamado el “año del hambre”.

En una economía como la novohispana, este tipo de eventos eran devastadores, ya que esta se centraba en la agricultura. Estas crisis de subsistencia “[...] influían en la dinámica natural de la población, ya que incrementaban la mortalidad. A pesar de que la natalidad era muy alta, el efecto de estas crisis sobre la población limitaba su crecimiento, alternando periodos de retroceso con otras de leve crecimiento. En todo caso, como es característico en el régimen demográfico antiguo, la población apenas crecía o crecía muy poco” (Tello, 2012).

80 En el caso de la mitra michoacana, los efectos de esta crisis se sintieron desde el mes de mayo de 1785. El Bajío, donde se localiza Santa Fe del Río, fue una de las zonas más afectadas. Según América Molina, en esta región, “para agosto de 1786 el escenario empeoró debido a ‘fiebres malignas con mortandad de toda clase de gentes’, por lo que se determinó hacer novenarios así como hospitales de beneficencia” (Del Villar, 1997).

En este contexto, en el obispado de Michoacán, destacan las acciones llevadas a cabo por el obispo fray Antonio de San Miguel (1783-1804) y José Pérez Calama, deán del cabildo catedral, como una “cruzada contra el hambre” en Valladolid, el fomento de la agricultura de regadío y dar préstamos sin réditos a terratenientes y hacendados que se comprometieran a cultivar las tierras (Magaña, 1996). Parte de estos proyectos se centraron en el Bajío, promoviendo la agricultura de riego a partir de enero de 1786; además de esto, esta zona, por su excelente calidad de tierra y extensas planicies, comparado con otras regiones, pudo disminuir un poco los efectos de esta crisis, dedicándose a sembrar otros cultivos. En añadidura, como ya se mencionó, Santa Fe estaba situado a orillas del río Grande, donde se podía obtener pescado para alimentarse, y, según lo estipulado en las *Ordenanzas* escritas por Vasco de Quiroga, el pueblo debía contar con una reserva de granos para momentos de escasez, lo que también pudo ayudar (Del Villar, 1997).

Según los estudios de Enrique Florescano, en 1785, en la misma época de la pérdida de las cosechas hubo una epidemia de “dolores de costado

y fiebres” que se prolongó hasta 1787 (Florescano, 1986). Otro ejemplo lo encontramos en la parroquia de Taximaroa, donde se ha encontrado que a la par con la carestía se dieron epidemias de “bola”, “fiebres”, dolores de costado, alfombrilla y pulmonía, enfermedades más de adultos que de infantes (Flores, 2016).

Para diversos curatos de los obispos de México, Michoacán y Guadalajara hubo muertes en abril de 1786 lo que sugiere que estas fueron producto de la crisis alimentaria. Oziel Talavera, encuentra que en el año del “gran hambre”, en Valladolid (hoy Morelia) hubo una gran crisis, mientras que en Pátzcuaro y Uruapan fue una crisis menor. En estas tres poblaciones, al tiempo de esta escasez de granos, hubo fiebres (Ibarra, 2014). De esta manera, en estas fechas no hay único padecimiento, sino que se mencionan varios, dependiendo de la zona de la que se trate. Este mismo autor, abonando a lo que mencioné previamente, señala que la elevada mortalidad de los años de 1785 a 1786 en estas tres poblaciones que él estudia se debieron a las epidemias y a las fiebres y no al hambre.

En el caso particular de Santa Fe del Río, su población ya había sido golpeada por el sarampión a inicios del año de 1785, meses antes de esta crisis alimentaria, muriendo 154 personas, sobre todo párvulos. Después del mes de mayo bajan los entierros, manteniéndose a la baja después de septiembre, mes en que se perdieron los cultivos.

Para el año siguiente se reducen las muertes a 75, pero aún son considerables si consideramos que ese año hubo 81 nacimientos, lo que nos habla de que ese año la población de Santa Fe del Río no creció (véase la gráfica 6). De estos decesos, la mayoría son de párvulos.

81

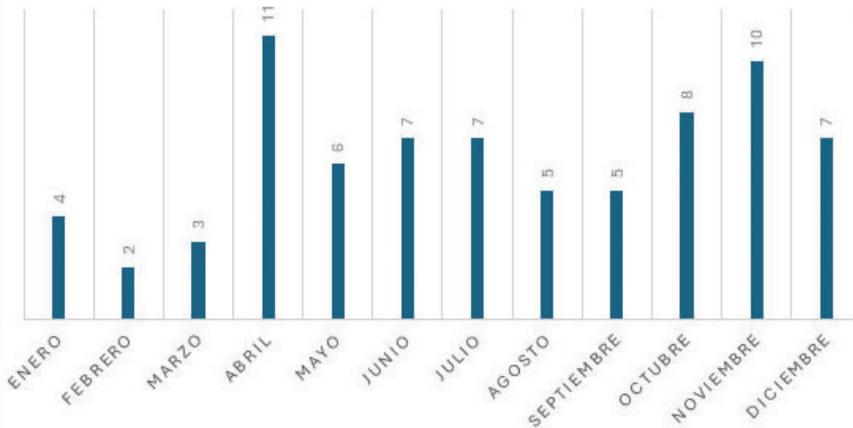
Tabla 3. Entierros por edad de 1786 en Santa Fe del Río

Adulto/a	31
Párvulo/a	44
Total	75

Fuente: Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Defunciones 1784-1824, consultado en: “Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996”, database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-1HSH-LH?wc=3NBC-HZ3%3A179077001%2C178662802%2C179296701&cc=1883388>), imágenes 29 a 37.

Al mismo tiempo, el mes con mayores entierros fue abril y luego estos vuelven a subir ligeramente en el último trimestre del año, de los cuales no es posible determinar su causa, ya que los curas de la parroquia de Santa Fe del Río no asentaban la causa de muerte; no obstante, como ya se mencionó, a mediados de 1786, gracias a los proyectos de siembra de riego la carestía de granos fue cediendo terreno, sin embargo, las enfermedades, se extendieron hasta 1787. De este modo, es posible que esta leve alza de las muertes en Santa Fe a fines del año se deba a las fiebres o alguna otra enfermedad respiratoria, las que se transmitían más fácilmente en esos meses de bajas temperaturas. De este modo, observamos como las enfermedades no van aparejadas con las crisis de subsistencia o el hambre.

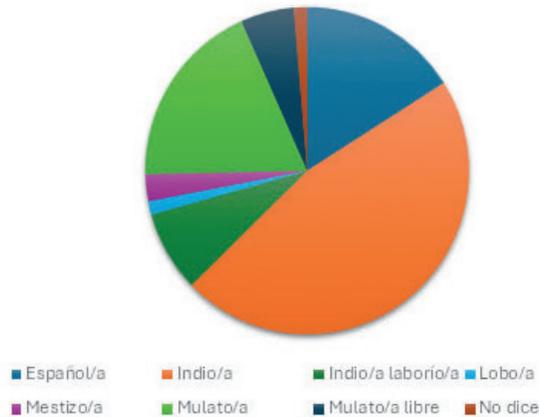
Gráfica 7. Entierros por mes del año de 1786 en Santa Fe del Río



Fuente: Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Defunciones 1784-1824, consultado en: “Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996”, database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-1HSH-LH?wc=3NBC-HZ3%3A179077001%2C178662802%2C179296701&cc=1883388>), imágenes 29 a 37.

Al analizar la calidad de los difuntos, los más afectados fueron los indios, seguidos por los mulatos y los españoles.

Gráfica 8. Entierros por calidad de 1786 en Santa Fe del Río



Fuente: Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Defunciones 1784-1824, consultado en: “Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996”, database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-1HSH-LH?wc=3NBC-HZ3%3A179077001%2C178662802%2C179296701&cc=1883388>), imágenes 29 a 37.

Del mismo modo, Santa Fe del Río era el lugar de origen de la mayoría de los difuntos, y, en segundo lugar, estaba la población cercana de Patámbaro.

Tabla 4. Entierros de 1786 por lugar de origen

La Loma	2	El Rincón	2
Quirambondiro	3	Silao	1
Salamanca	1	Marfil	1
Irapuato	2	No dice	2
Forastero	1	Santa Bárbara	1
Pénjamo	1	Santa Fe	44
El Cuisillo	1	Patámbaro	12
Guándaro	1	Total	75

Fuente: Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Defunciones 1784-1824, consultado en: "Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996", database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-1HSH-LH?wc=3NBC-HZ3%3A179077001%2C178662802%2C179296701&cc=1883388>), imágenes 29 a 37.

84

En este sentido, en 1786 vuelve a haber una cifra elevada de entierros, bajando hasta 1787. No obstante, de los fallecidos, la mayoría siguen siendo los párvulos, aunque también vemos que el número de entierros de los adultos se eleva comparado con el año anterior. Según estas cifras, en nuestra comunidad, no hubo un gran impacto de esta crisis alimentaria, posiblemente por su cercanía al río Grande, su reserva de granos y por estar en una zona dónde se podían sembrar otros cultivos y en la cual las autoridades civiles y eclesiásticas echaron a andar proyectos agrícolas.

Conclusiones

Concluyo este trabajo señalando la importancia de hacer este tipo de estudios para otras poblaciones de la época colonial, ya que, solo así, podremos conocer las afectaciones particulares que se vivieron en cada lugar a raíz de las crisis de subsistencia. Como ya lo han demostrado este tipo de trabajos, no debemos generalizar, cada lugar y población es distinta y merece un estudio particular.

En el caso del pueblo-hospital de Santa Fe del Río, su análisis permitió conocer más de cerca la dinámica parroquial regional en donde su parroquia jugaba un importante papel atrayendo a poblaciones cercanas.

También vimos como en este pueblo había presencia importante de otras calidades, no únicamente indios como se ha afirmado, destacando los mulatos y los españoles.

Respecto al “año del hambre”, este afectó en nuestra comunidad causando un estancamiento demográfico ya que nacían casi los mismos que mueren en 1786. Sin embargo, estas afectaciones no fueron tan severas, posiblemente debido a que los habitantes de Santa Fe pudieron dedicarse a otros cultivos, aprovechando que en la zona se implementaron diversos proyectos para paliar esta situación y a la cercanía del río, donde se podía pescar, además de que es posible que contaran con una reserva de granos, debido a lo dispuesto por Vasco de Quiroga en sus *Ordenanzas* que regían a este pueblo. Aquí se ve como una crisis fue atenuada para esta comunidad por el medio ambiente.

Así, nos encontramos frente a una comunidad que valiéndose de los recursos de su entorno físico y organización social pudo sobrellevar mejor este acontecimiento.

Fuentes documentales

Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Bautismos 1775-1817, consultado en: “Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996”, database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-B59Z-Y4?wc=3NY1-168%3A179077001%-2C178662802%2C179081801&cc=1883388>), imágenes 25 a 166.

Archivo parroquial de Santa Fe del Río, Asunción, Defunciones 1784-1824, consultado en: “Mexico, Michoacán, Catholic Church Records, 1555-1996”, database with images, FamilySearch, (<https://www.familysearch.org/ark:/61903/3:1:9392-1HSH-LH?wc=3NBC-HZ3%3A179077001%2C178662802%2C179296701&cc=1883388>), imágenes 6 a 49.

Bibliografía

Argumaniz Tello, Juan L. (2012). “*Los años del hambre*” *Guadalajara y sus alrededores durante el lapso de sobremortalidad de 1785-1786* [tesis de maestría no publicada, Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades, División de Estudios Históricos y Humanos].

- Brading, D. (1973). La estructura de la producción agrícola en el Bajío de 1700 a 1850. *Historia mexicana*, 23, (2), 197-237.
- Bravo Ugarte, J. (1963). *Historia sucinta de Michoacán*. Tomo II. Editorial Jus.
- Cardozo Galué, G. (1973). *Michoacán en el Siglo de las Luces*. El Colegio de México.
- Florescano, E. (1986). *Precios del maíz y crisis agrícolas en México, 1708-1810*. Ediciones Era.
- González Flores, José G. (2026). La fatídica década de 1780 en una parroquia de Michoacán: epidemias y consecuencias demográficas en Tximaroa, 1780-1790. *Relaciones. Estudios de historia y sociedad*, 37, (146), 83-118.
- González, L. (1980). Ciudades y villas del Bajío colonial. *Relaciones*, I (4), 100-111.
- Jaramillo Magaña, J. (1996). *Hacia una Iglesia beligerante. La gestión episcopal de Fray Antonio de San Miguel en Michoacán (1784-1804) Los proyectos ilustrados y las defensas canónicas*. El Colegio de Michoacán.
- Lorenzana, F. A. de. (1769). *Concilios Provinciales primero y segundo, celebrados en la ... ciudad de México, presidiendo el Ilmo. y Rmo. Fr. Alonso de Montúfar en los años 1555 y 1565*. Imprenta del Superior Gobierno del Bachiller Don Joseph Antonio de Hogal,
- Mazín, Ó. (1987). *Entre dos majestades. El obispo y la Iglesia del Gran Michoacán ante las reformas borbónicas, 1758-1772*. El Colegio de Michoacán.
- Molina del Villar, A. (1997). "Crisis, agricultura y alimentación en el obispado de Michoacán (1785-1786)". Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Históricas, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, 183-223.
- Morin, C. (1979). *Michoacán en la Nueva España del siglo XVIII. Crecimiento y desigualdad en una economía colonial*. Fondo de Cultura Económica.
- Sánchez Rodríguez, M. (2002). El granero de la Nueva España. Uso del entarquinamiento para la producción de cereales en el bajío mexicano. *Boletín del Archivo Histórico del Agua*, (22), 12-20.
- Talavera Ibarra, O. (2014, 28 al 30 de mayo). *La mortalidad en tres asentamientos michoacanos: siglos XVII al XIX [ponencia]*. XII Reunión Nacional de Investigación Demográfica en México, Ciudad de

- México. http://xiireuniondemografica.iberomex.mx/pdf/resumen_extenso/18.3.3.pdf
- Talavera Ibarra, Oziel U. (2015). La crisis de los años 1785-1786 en Michoacán: ¿El “gran hambre” o las grandes epidemias?. *Tzintzún*, (61), 83-129.
- Tena Ramírez, F. (1990). *Vasco de Quiroga y sus pueblos de Santa Fe en los siglos XVIII y XIX*. Editorial Porrúa.
- Terán, M. (2003). “El liderazgo indio de Valladolid, la diversidad de gobiernos en los pueblos y la política indigenista borbónica (1786-1810)”. El Colegio de Michoacán, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 361-382.
- Warren, B. (2015). *Vasco de Quiroga y sus pueblos hospitales de Santa Fe*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Históricas, Secretaría de Difusión Cultural y Extensión Universitaria.
- Zavala S. (1941). *Ideario de Vasco de Quiroga*. El Colegio de México.

BLOQUE 2
GESTIÓN DEL AGUA

CALIDAD DE AGUA EN COMUNIDADES DE LA MESETA PURÉPECHA

**Sayra Orozco¹, Luis Bernardo López Sosa², Mario Morales-Máximo²,
Esteban Montiel³, Michel Rivero⁴**

¹ Posgrado de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Morelia, 58060, Michoacán, México.
sorozcocerros@gmail.com

² Universidad Intercultural Indígena de Michoacán Carr. Pátzcuaro-Erongaricuaro km 3 (Quinta Tzipehua), Huecorio, 61613, México

³Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc, UAEM, Ayala, 62715, Morelos, México

⁴ Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta Morelia, 58190, Michoacán, México.
mrivero@materiales.unam.mx

91

Resumen

En este capítulo se aborda la importancia de la calidad de agua en las comunidades, que permite garantizar la salud de la población y de los ecosistemas. Adicionalmente se presenta una metodología para evaluar el índice de calidad de agua de los recursos hídricos en las comunidades Pichátaro de San Francisco, San Ángel de Zurumucapio, Carapan, Naranja de Tapia y Tingambato de la Meseta Purépecha de Michoacán, mediante análisis de parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno, sólidos totales disueltos, alcalinidad y nitratos) bajo las normas oficiales mexicanas y métodos estandarizados.

Palabras clave: agua, gestión, calidad, comunidad.

Recurso hídrico

El agua es vital para la supervivencia de ser humano. México enfrenta grandes retos en gestión del recurso hídrico, entre estos destacan la distribución, el desperdicio, la contaminación y escasez del recurso hídrico, así como en el manejo del agua residuales de los sectores residencial y productivos (Chinmayi y Ramesh, 2024; Chen y Vardon. 2024).

La distribución, en el tiempo y espacio, de este vital líquido es no igualitaria. Ante esto, es importante el diseño, la planificación, la implementación y la supervisión de marcos regulatorios en materia de recurso hídrico para hacer frente a los objetivos sociales, ambientales y económicos actuales y futuros. Esta tarea se complica más considerando que el sistema se vuelve cada día más complejo y grande, con una distribución espacial variable del agua y recursos insuficientes.

92 El sector agrícola es uno de sectores productivos con el mayor consumo de agua, y este sector es de tal importancia que permite dar seguridad alimentaria a la población. No obstante, este sector usa de forma desmesurada y desperdicia el recurso hídrico, así como es uno de principales sectores de que contaminan el recurso. Esto se puede atribuir a que el sector emplea tecnologías obsoletas y grandes cantidad de agroquímicos con el propósito de incrementar la productividad del suelo y combatir plagas.

En México la situación del recurso hídrico se agrava, el descuido de fuentes críticas de agua, como el agua de lluvia y a la escorrentía del suelo han provocado escasez de agua subterránea y superficial. Por lo que resulta imperante el desarrollo de estrategias para la gestión de agua.

En los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que tienen como propósito poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar la paz y prosperidad de las personas hacia el 2030, y que reconocen que la necesidad de desarrollar acciones para equilibrar la sostenibilidad social, económica y ambiental (ODS-PNUD, 2015). Si bien los ODS están estrechamente vinculados, en materia de recurso hídrico destaca el Objetivo 6, enfocado al agua limpia y saneamiento. Las metas de objetivo 6 de los ODS se describen en la Figura 1.

ODS 6

Acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible

Acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos

Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando el reciclado y la reutilización sin riesgos

Aumentar el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento

Implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles

Proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.

Ampliar la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo para desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización

Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento.

93

Figura 1. Metas del ODS 6. Agua Limpia y saneamiento (ODS-PNUD, 2015).

Para alcanzar las metas en materia de recursos hídrico se ha desarrollado programa para la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH), desde un enfoque sostenible, justo y equitativa. En la Figura 2 se presentan algunas de las estrategias para GIRH (Acheampong y col. 2016; Capodaglio y col., 2016; Gerasidi y col. 2009). La descripción de cada una de las estrategias se describe a continuación.

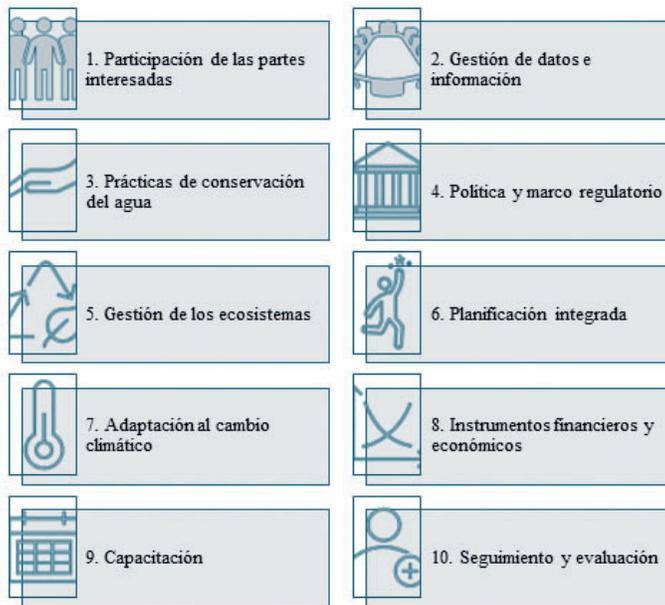


Figura 2. Estrategias para la GIRH.

Estrategias para GIRH (Chinmayi y Ramesh, 2024; Chen y Vardon, 2024; Acheampong y col. 2016; Capodaglio y col., 2016; Gerasidi y col. 2009):

1. Participación de las partes interesadas. Propiciar la inclusión de las comunidades locales, a través de procesos participativos en la propuesta, planificación e implementación de actividades y en la toma de decisiones.
2. Gestión de datos e información, recopilar datos exhaustivos que brinden información sobre la calidad, cantidad y uso del agua en todos los sectores, incorporando sistemas geoespaciales para un mejor análisis y visualización de datos.
3. Prácticas de conservación del agua, siendo el pilar fundamental la educación y la concientización del recurso, así como promover y fomentar prácticas para el uso eficiente para la recogida de aguas pluviales y el reciclaje de aguas grises.
4. Políticas y marco regulatorio para esta estrategia es vital el desarrollo de políticas claras, y la creación de directrices que apoyen el uso

- sostenible, junto y equitativo del agua y protejan los ecosistemas, a través del cumplimiento de leyes y normas.
5. Gestión enfocada en la protección y preservación de los ecosistemas que sustentan los recursos hídricos e incorporar tecnologías de remediación para restaurar las zonas degradadas.
 6. Planificación y desarrollo de planes integrales que consideren el ecosistema y sus interacciones.
 7. Adaptación al cambio climático a través de evaluación de vulnerabilidades y el desarrollo de estrategias de resiliencia.
 8. Instrumentos financieros y económicos para incrementar la inversión en infraestructura y tecnologías que contribuyan al ahorro del recurso hídrico.
 9. Capacitación a través de la educación y formación a los gestores locales del agua y a las comunidades.
 10. Seguimiento y evaluación empleando indicadores clave de seguimiento de los avances y evaluaciones periódicas.

Para guiar las estrategias para la GIRH tiene cuatro principios:

1. El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para mantener la vida
2. El desarrollo y la gestión del agua deben basarse en un enfoque participativo
3. Las mujeres desempeñan un papel central en el suministro, la gestión y la salvaguarda del agua
4. El agua tiene un valor económico en todos sus usos concurrentes y debe ser reconocida como un bien económico

Estos principios están enfocados en el suministro de agua potable, mantener unos recursos hídricos sanos, y equilibrar la oferta y la demanda de agua. Así como valorar el recurso hídrico incorporando incentivos económicos para mejorar los resultados ecológicos y socioeconómicos.

Los objetivos de desarrollo sostenible, las estrategias y principios de gestión integral del recurso hídrico deben ser abordados e implementados con enfoque de investigación participativa basada en la comunidad, evaluamos el impacto de las herramientas tecnológicas incorporadas y la mayor participación de la comunidad en las operaciones y la sostenibilidad de estas herramientas.

Gestión del agua en las comunidades

El desarrollo de las comunidades y las actividades antropogénicas han generado grandes retos en las comunidades, en términos de demanda y la potencial escasez de los recursos disponibles, así como la contaminación. Estos retos evidencian y visibilizan la necesidad del desarrollo de estrategias eficaces de gestión del agua.

96 En las comunidades, la gestión integral del recurso hídrico no sólo debe involucrar la planificación, incorporación y seguimiento de sistemas tecnológicos (como embalses y redes de distribución) que garanticen el acceso sostenible a agua limpia para el uso y consumo de la población, y los sectores productivos, sino también sistemas de saneamiento, a través de plantas de tratamiento de agua, que operen de forma adecuada y que permitan el reúso del recurso con el propósito de su optimización. Dentro de la gestión integral, el pilar fundamental debe ser la participación de la comunidad, no sólo en la toma de decisiones sino también en la adopción de formas de vida sostenible, a través de programas integrales de educación ambiental y el reconocimiento y la incorporación de saberes ancestrales.

Para la gestión del agua en la comunidad se debe propiciar la colaboración entre gobiernos locales, organizaciones y la comunidad, lo cuáles son cruciales para abordar retos como la contaminación, la extracción excesiva y el cambio climático, y con ello garantizar la salvaguarda de los recursos hídricos para las generaciones futuras. El éxito de la gestión del agua está asegurado si se establecen mesas de trabajo y foros para la toma de decisiones colectiva, el intercambio de conocimientos y la planificación colaborativa de proyectos.

Dentro de las prácticas adoptadas en las comunidades son la recolección de agua de lluvia, el reciclado de aguas residuales y la protección de las fuentes naturales de agua, para aumentar su capacidad de recuperación frente a sequías e inundaciones, ver Figura 3.



Figura 3. Prácticas sostenibles para el agua en las comunidades. Fotografía: Rosa María Gallardo Álvarez. Proyecto PRONACES Energía: 319333.

Calidad de agua

El acceso al agua potable y su saneamiento es un derecho humano esencial para satisfacer sus necesidades básicas (FAO, 2023; AMCH, 2022). Por lo que garantizar su disponibilidad, salubridad, aceptabilidad y asequibilidad debe ser una prioridad. La presencia de microorganismos, sustancias químicas y radiológicas, así como metales pesados constituyen una amenaza para la salud humana. La calidad del agua potable está relacionada con diferentes parámetros fisicoquímicos, cuyos valores le confieren al agua un color, olor y sabor que puede o no ser aceptable para su uso y consumo.

La contaminación de agua se puede estudiar por la evaluación de parámetros fisicoquímicos, que dan información sobre de la calidad química del agua, para efectos del monitoreo. Una de las herramientas que se emplear en el estudio de la calidad de agua es el Índice de Calidad del Agua (ICA). Las aplicaciones del ICA se presentan en la Figura 4.

El ICA se define como el grado de contaminación existente en el agua a la fecha de un muestreo, expresado como un porcentaje de agua pura. Así, agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a 0%, y de 100% para el agua en excelentes condiciones (Conagua, 2022). En la Tabla 1 se presentan los requerimientos de tratamiento para el agua potable y uso agrícola con base en los valores del índice de calidad de agua.

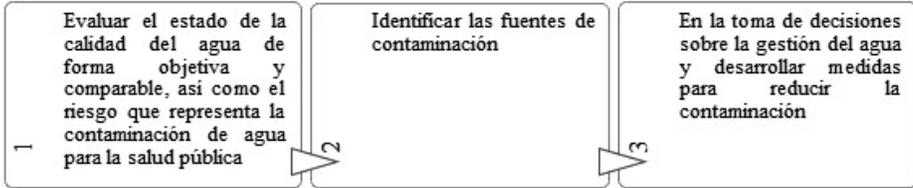


Figura 4. Aplicaciones del ICA.

Tabla 1. ICA para agua potable y de uso agrícola

98

USO			
ICA	Potable	ICA	Agrícola
100	No requiere purificación para su consumo	100	No requiere tratamiento para su uso
90	Requiere purificación menor	90	Tratamiento menor para cultivos que requieran alta calidad de agua para riego
80	Dudoso para su consumo sin purificación	80	
70	Tratamiento de potabilización es indispensable	70	Utilizable en la mayoría de los cultivos
60		60	
50	Dudosa para consumo	50	Tratamiento requerido para su uso
40	Inaceptable para consumo	40	
30		30	Sólo para cultivos resistentes (Forrajes)
20		20	
10		10	Inaceptable para riego

El agua que llega a cada hogar tiene una calidad potable, pero no necesariamente es una calidad que permita que pueda ser consumida por el ser humano (ver Tabla 1). El agua contiene compuestos, que, si bien no son tóxicos para el ser humano, pueden provocar efectos en la salud de la

población. Por ello resulta vital el estudio de la calidad de agua de uso y consumo humano (Rodríguez, 2022).

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y la Comisión Nacional del Agua han realizado estudios de calidad de agua en México (SEMARNAT, 2011; RENAMECA, 2024), a través de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua reportó el monitoreo de 450 sitios superficiales y 606 sitios subterráneos, como se muestra en la Figura 5. Para la evaluación de calidad de agua en recursos hídricos superficiales se consideraron los parámetros: Demanda Bioquímica de Oxígeno con 5 días de digestión (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendedos Totales (SST), Coliformes Fecales (CF), Toxicidad y Oxígeno Disuelto (OD). Con la finalidad de comparar los resultados por sitio de monitores, se estableció un semáforo de calidad del agua verde cuando hay cumplimiento de todos los parámetros indicadores, amarillo cuando se incumple en uno o más de los siguientes parámetros: alcalinidad total, conductividad eléctrica, dureza total, sólidos disueltos totales, hierro total y manganeso total, y rojo cuando se incumple en uno o más de los siguientes parámetros: fluoruros, coliformes fecales, nitrógeno en nitratos, arsénico total, cadmio total, cromo total, mercurio total y plomo total. En la Figura 6 se presenta los resultados de la calidad de agua en los sitios monitoreados, tanto en aguas superficiales como subterráneas.

99

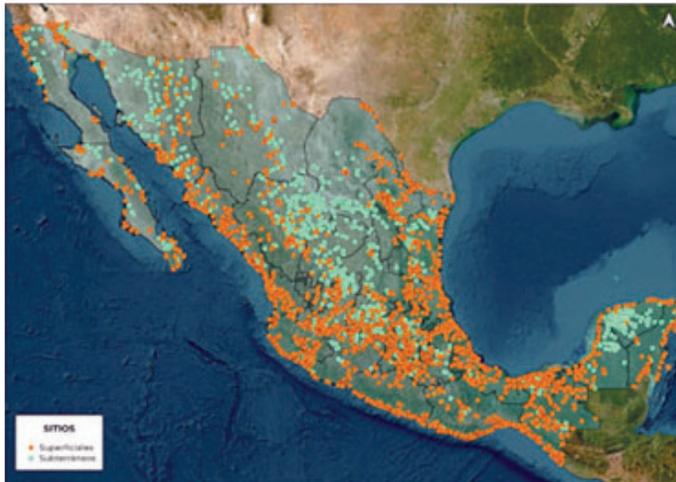


Figura 5. Sitios monitoreados superficiales y subterráneos (RENAMECA, 2024).

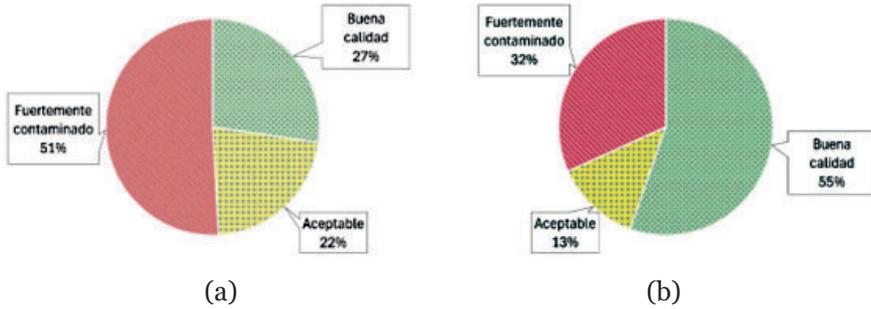


Figura 6. Calidad de agua en mantos acuíferos: (a) superficiales y (b) subterráneas.

Los resultados muestran que un 50.9% de los sitios superficiales se encuentran fuertemente contaminados. Mientras que, para sitios subterráneos representó el 32%. Estos resultados permiten conocer de manera general el grado de contaminación de los recursos hídricos en México y desarrollar estrategias y programas para la restauración de sitios y con ello garantizar la salud de la población y de los ecosistemas (RENAMECA, 2024). Estos estudios de contaminación se realizan mayormente en regiones o centros urbanos. Sin embargo, no se ha dimensionado el grado de contaminación en mantos acuíferos en las comunidades vulnerables cercanas a estos centros.

Calidad de agua en las comunidades de la Meseta Purépecha

Michoacán de Ocampo tiene 4,749 millones de habitantes, ocupando el noveno lugar a nivel nacional (INEGI, 2010). Michoacán ocupa el quinto lugar nacional de pobreza, tiene 113 municipios, con 9,490 localidades rurales.

En Michoacán es una de las zonas más montañosas del país. El estado cuenta con 14 de las 18 unidades de tipos de suelos reportadas para México. El leptosol, regosol, luvisol, acrisol, andosol, vertisol y feozem son los suelos más importantes en el estado, ya que abarcan el 94% del territorio michoacano (Gopar-Merino y Velázquez, 2016).

Michoacán forma parte de dos de las cuencas hidrológicas más importantes del país, Río Lerma y Balsas. En la región centro-norte de Michoacán, se localizan los Ríos Tlalpujahuá, Cachiví y Duero, afluen-

tes principales del Río Lerma. Mientras que, para el Río Balsas, los principales afluentes son los ríos Cutzamala, Carácuaro y Tepalcatepec, siendo este último el mayor recolector de lluvia (Gopar-Merino y Velázquez, 2016).

Algunos indicadores relacionados con la calidad de vida son: 78.3% disponen de agua entubada dentro de la vivienda, 99.3% cuentan con energía eléctrica y 79.4% tienen drenaje conectado a la red pública, ubicando a Michoacán con un nivel “Alto” de marginación (Lemuz-Ruíz, 2020). Las actividades económicas características del estado de Michoacán incluyen agricultura, pesca, alfarería y fabricación de artesanías (textiles y en madera) (Saavedra y col., 2021). El desarrollo de estas actividades implica el uso de agroquímicos, colorantes, y tensoactivos que podrían contener metales pesados y otros contaminantes que están presentes en el agua residual. Ante el escaso o nulo tratamiento de aguas residuales y su descarga ilegal en mantos acuíferos, se podría poner en riesgo la salud de los ecosistemas y de la población, así como la sostenibilidad de las comunidades, ver Figura 7.

En la Meseta Purépecha, los recursos hídricos principales de abastecimientos son manantiales y norias de caudal pequeño, que son variables durante todo el año. En los últimos años la escasez y contaminación del recurso hídrico es uno de los grandes retos que enfrentan. La contaminación del recurso hídrico es atribuida a los aspectos mencionados anteriormente, mientras que la escasez no sólo se debe a aspectos socioambientales, sino también a conflictos y poder, que han incidido en una gestión ineficiente del recurso hídrico (Ávila-García, 2020).



102

Figura 7. Actividades económicas en Michoacán de Ocampo.

De acuerdo con Lemuz-Ruíz (2020) (Lemuz-Ruíz, 2020), los recursos hídricos se encuentran en un avanzado estado de deterioro, abatimiento de mantos freáticos y contaminación de estos. Algunos de los factores que han provocado esta situación en los recursos hídricos se enlistan en la Figura 8 (Lemuz-Ruíz, 2020).

Factores

- Deforestación
- Uso y cambio de uso de suelo y su manejo inadecuado
- Erosión del suelo que produce azolves en los lagos
- Reducción de superficie y profundidad de los lagos
- Falta de infraestructura de saneamiento, parcial cobertura del alcantarillado, el uso de fosas sépticas y letrinas que afectan los acuíferos
- Manejo inadecuado de los residuos sólidos urbanos y descargas ilegales de agua residuales en mantos hídricos

Figura 8. Factores que han contribuido al deterioro del recurso hídrico.

Las razones mencionadas anteriormente nos muestran la importancia de evaluar la calidad de agua de los distintos recursos hídricos que abastece a las comunidades, esto para garantizar la salud de la población y de los ecosistemas, y esta actividad se debe realizar de manera periódica. En Michoacán, la calidad de agua se ha visto afectada por el contenido de minerales (dureza), sólidos disueltos totales, turbidez y sílice (AMCH, 2022). Lo cual se atribuye a las características propias del tipo de suelo del estado (Gopar-Merino y Velázquez, 2016).

Toscano-Reyes y col. (2022) evaluaron la calidad del agua de seis manantiales que abastecen de agua potable y riego agrícola a la comunidad El Platanal, en Michoacán. En este trabajo se realizaron dos etapas de recolección de muestras, (estiaje y precipitación pluvial). Los parámetros evaluados fueron fisicoquímicos, microbiológicos y elementos traza. Los resultados muestran especies dominantes, entre las que destacan Ca^{2+} - HCO_3^- . Además, se encontraron concentraciones de Fe (0.8 mg/L) superiores a los límites máximos permisibles por las normas mexicanas para agua potable. El sitio de muestreo (etiquetado como S6) presentó las concentraciones más elevadas de algunos parámetros (NO_3^- , PO_4^{3-} , coliformes fecales). El cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA) mostró que el agua de los manantiales no es apta para uso potable, pero sí para riego agrícola.

Mendoza y col. (2023) estudiaron la calidad del agua del río Cupatitzio; considerando 20 sitios de muestreo, en temporada de lluvias y de secas. Lo autores obtuvieron resultados sobre 31 elementos traza y 15 parámetros fisicoquímicos. Los resultados mostraron que, para la estación lluvio-

sa, los índices de calidad presentan la peor calidad, debido a la descarga de aguas residuales y lixiviados de un vertedero. Mientras que, en época de secas, la baja calidad se alcanza en la cuenca baja. Es importante mencionar que los autores reportaron altas concentraciones de Fe, Al y P, asociados a los plaguicidas utilizados en los huertos de aguacate. Los autores reportaron que el agua del río no es apta para uso y consumo humano (Mendoza y col., 2023).

Sosa y col. (2022) investigaron la calidad abiótica y biótica del río Cuapatitzio. Los autores reportan que la calidad del agua es mayormente media y contiene alta concentración de materia orgánica y nutrientes (máximos de NO_3 de 12.39 mg/L y NH_4 de 7.31 mg/L (Sosa y col., 2022).

Mendoza-Ramírez y col. (2023) analizaron el índice de calidad del agua (ICA) en 5 sitios de muestreo en el lago Zirahuén, Michoacán. Los resultados del ICA en los puntos de muestreo tienen valores entre pobre y regular en la escala de clasificación (Mendoza-Ramírez y col., 2023).

Con el propósito de evaluar la calidad de agua en comunidades de la Meseta Purépecha se consideraron cinco comunidades: Tingambato, San Ángel Zurumucapio, Pichátaro, Carapan y Naranja de Tapia. A continuación, describe a detalle el proyecto para la Evaluación de la calidad de agua en la Meseta Purépecha.

104

Evaluación de la calidad de agua en la Meseta Purépecha:

Caso de estudio

Sitios de muestreo

Para la evaluación de índice de calidad de agua las comunidades se recolectaron muestras en los diferentes recursos hídricos de abastecimiento.

Para la toma de muestras, se consideraron 3 sitios en la comunidad de Tingambato, 4 puntos en San Ángel Zurumucapio, 5 puntos de San Francisco Pichátaro, 2 puntos en Naranja de Tapia y 1 punto de Carapan. La información se resume en la Tabla 2, en donde se incluye la ubicación de la toma de muestra, así como la latitud y longitud de cada punto de muestreo (PM). Es importante mencionar que en algunos puntos de muestreo se tomaron dos muestras.

Tabla 2. Sitios de muestreo en las comunidades consideradas en el este caso de estudio. En la versión digital se incluye el hipervínculo

Recurso hídrico	Comentario	Ubicación	Latitud	Longitud
Tingambato PMO1 ^(a,b)	Manantial		19.501454	-101.866909
Tingambato PMO2 ^(a,b)	Manantial		19.498257	-101.863729
Tingambato PMO3 ^(a,b)	Pozo		19.495231	-101.845721
San Ángel Zurumucapio PMO1 ^(a,b)	Manantial (Alto)		19.451661	-101.860361
San Ángel Zurumucapio PMO2 ^(a,b)	Manantial (Habitacional)		19.449428	-101.890586
San Ángel Zurumucapio PMO3	Manantial (Pila)		19.444568	-101.890432
San Ángel Zurumucapio PMO4	Pilas		19.444787	-101.890116
San Francisco Pichátaro PMO1 ^(a,b)	Pila		19.600344	-101.833148
San Francisco Pichátaro PMO2 ^(a,b)	Pilas		19.585574	-101.811488
San Francisco Pichátaro PMO3	Pozo		19.585224	-101.825808
Naranja de Tapia PMO1-PMO2	Pozo		19.782527	-101.763580
Naranja de Tapia PMO3	Laguna (I)		19.781737	-101.763080
Naranja de Tapia PMO4	Laguna (II)		19.781472	-101.762670
Naranja de Tapia PMO5	Laguna (III)		19.781778	-101.762310
Carapan PMO1-PMO2	Manantial (I)		18.853139	-102.031970
Carapan PMO3	Manantial (II)		19.853278	-102.031810

La identificación de los puntos y los requerimientos en el muestreo se realizaron con base en la norma NOM-230-SSA1-2002 (NOM-230-SSA1-2002).

Tingambato: La población total de Tingambato, hasta el 2020 fue de 16,325 habitantes, siendo 51.4% mujeres y 48.6% hombres. El índice de Gini¹ es de 0.36, lo cual representa que la comunidad tiene un grado de inequidad importante. La economía de Tingambato es principalmente por actividades agrícolas. La tasa de analfabetismo es de 6.81% (2020). Las principales carencias sociales que se identificaron en Tingambato son carencia por acceso a la seguridad social, a los servicios básicos en la vivienda y a los servicios de salud. Esta situación ha sido atendida. De acuerdo con INEGI (INEGI, 2010) hasta el 2020, 26 viviendas no cuentan con servicio de agua y drenaje, lo cual ha representado una disminución en esta brecha. En la Figura 9 se muestra la Ubicación de los puntos de muestreo (en rojo) en Tingambato y en la Figura 10 se presentan algunas imágenes recopiladas durante la toma de muestras.

106



Figura 9. Ubicación de los puntos de muestreo (en rojo) en Tingambato. Fuente: Google Maps.



Manantial (PM01)



Manantial (PM02)



Pozo (PM03)

Figura 10. Puntos de muestreo en Tingambato Fuente: Propias.

San Ángel Zurumucapio: En 2020, de acuerdo con el INEGI, la población en San Ángel de Zurumucapio es de 5,788 habitantes. Algunos indicadores de la comunidad son: 99.47% de viviendas cuentan con servicio de electricidad, 97.42% con agua entubada, y el 66.43% con servicio sanitario. El suministro de recurso hídrico es a través de manantiales con una capacidad de 50 m³, de los cuales se extraen a 30 L s⁻¹. En la Figura 11 se muestra la Ubicación de los puntos de muestreo (en rojo) en San Ángel de Zurumucapio y en la Figura 12 se presentan algunas imágenes recopiladas durante la toma de muestras.

107



Figura 11. Ubicación de los puntos de muestreo (en rojo) en San Ángel de Zurumucapio. Fuente: Google Maps.



Manantial, Alto (PM01)



Manantial, Habitacional
(PM02)



Manantial, Pila (PM03)



Pilas (PM04)

108

Figura 12. Puntos de muestreo en San Ángel de Zurumucapio Fuente: Propias

San Francisco Pichátaro: En 2020, de acuerdo con el INEGI, la población en San Francisco Pichátaro es de 5,696 habitantes. Algunos indicadores de la comunidad son: 95.66% de viviendas cuentan con servicio de electricidad, 80.72% con agua entubada, y el 97.05% con servicio sanitario. En la Figura 13 se muestra la Ubicación de los puntos de muestreo (en rojo) en San Francisco Pichátaro y en la Figura 14 se presentan algunas imágenes recopiladas durante la toma de muestras.



Figura 13. Ubicación de los puntos de muestreo (en rojo) en San Francisco Pichátaro. Fuente: Google Maps.



Pilas (PM02)

110



Pila (PM01)



Pozo (PM03)

Figura 14. Puntos de muestreo en San Francisco Pichátaro Fuente: Propias.

Naranja de Tapia: En 2020, de acuerdo con el INEGI, la población en Naranja de Tapia es de 3,243 habitantes. Algunos indicadores de la comunidad son: 98.40% de viviendas cuentan con servicio de electricidad, 98.40% con agua entubada, y el 98.40% con servicio sanitario. Naranja de Tapia tiene manantiales que abastecen al lago y a la población. En la Figura 15 se muestra la Ubicación de los puntos de muestreo (en rojo) en Naranja de Tapia y en la Figura 16 se presentan algunas imágenes recopiladas durante la toma de muestras.



Figura 15. Ubicación de los puntos de muestreo (en rojo) en Naranja de Tapia.
Fuente: Google Maps.

111



Pozo (PM01)



Laguna I (PM02)



Laguna II (PM03)



Laguna III (PM04)

Figura 16. Puntos de muestreo en Naranja de Tapia Fuente: Propias

Carapan: En 2020, de acuerdo con el INEGI, la población en Carapan es de 6,867 habitantes. Algunos indicadores de la comunidad son: 96.01% de viviendas cuentan con servicio de electricidad, 96.40% con agua entubada, y el 93.82% con servicio sanitario. Carapan cuenta con el manantial Kuinio, que abastece a la población. En la Figura 17 se muestra la Ubicación de los puntos de muestreo (en rojo) en Carapan y en la Figura 18 se presentan algunas imágenes recopiladas durante la toma de muestras.



Figura 17. Ubicación de los puntos de muestreo (en rojo) en Carapan. Fuente: Google Maps.

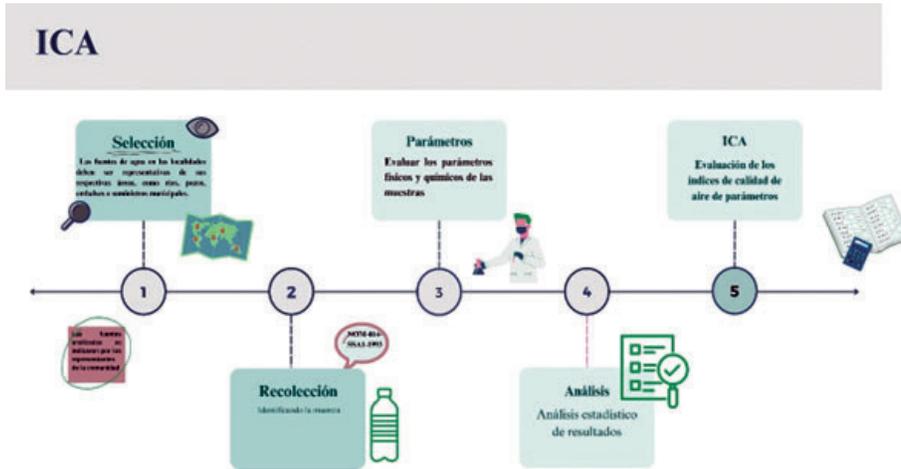


Figura 18. Puntos de muestreo en Carapan. Fuente: Propia.

Metodología

La evaluación del ICA en los recursos hídricos es un procedimiento crucial para estudiar la calidad de agua en una región, localidad y/o comunidad. El ICA se aplican en una zona concreta, basándose en diferentes parámetros comparados con normas específicas. Además, se utilizan para ilustrar los ciclos anuales, las variaciones espacio-tiempo y las tendencias de la calidad del agua. El ICA refleja el rango de calidad del agua en lagos,

arroyos, ríos y embalses (Chidiac y col., 2023). El procedimiento para la evaluación de ICA (ver Figura 19) se describe a continuación.



114

Figura 19. Diagrama de flujo del procedimiento para la evaluación del ICA.

- 1. Selección de las fuentes de agua de las localidades a analizar:** Las fuentes de agua en las localidades deben ser representativas de sus respectivas áreas, como ríos, pozos, embalses o suministros municipales. En las comunidades analizadas, los representantes de la comunidad participaron de manera activa para selección dado a que tienen un conocimiento más amplio al respecto.
- 2. Recolección de muestras de agua:** La recolección de las muestras de agua se realizó con base en las normas oficiales mexicanas vigentes.
- 3. Evaluación de parámetros para análisis del Índice de calidad del agua:** Este análisis considera evaluar los parámetros físicos y químicos de las muestras: El análisis fisicoquímico *in-situ* de las muestras incluye pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT) y oxígeno disuelto (OD) mediante métodos electroquímicos. Las especificaciones de los equipos para el análisis por métodos electroquímicos se presentan en la Tabla 3. Posteriormente, las muestras se conservaron y almacenaron de acuerdo con la norma NOM-230-SSA1-2002 (NOM-230-SSA1-2002) para realizar el resto de los análisis y procesos en el laboratorio.

En el laboratorio se evaluaron los parámetros de dureza, nitratos, demanda química de oxígeno y oxígeno disuelto. El parámetro de dureza se realizó por el método de Titulación EDTA, la concentración de nitratos se efectuó por espectrofotométrico UV, la demanda química de oxígeno por método colorimétrico por digestión de dicromato potásico, en condiciones ácidas MX-AA-030/1-SCFI-2012 (MX-AA-030/1-SCFI-2012), y oxígeno disuelto fue medido por el Principio de método Yodométrico (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2004).

Tabla 3. Especificaciones de los equipos empleados para el análisis electroquímico de los parámetros medidos *in-situ*

Parámetro	Sensor	Intervalo
pH	HI98129 Hanna	0.00-14.00 (± 0.05)
CE, mS cm ⁻¹	HI98129 Hanna	0.00-20.00 mS cm ⁻¹
OD, mg L ⁻¹	HI9142 Hanna	0.0-19.9 mg L ⁻¹
SDT, ppt	HI98129 Hanna	0.00-10.00 ppt

4. Análisis estadístico de resultados. Para este propósito se empleará la media (**Ec. 1**) y la desviación media (**Ec. 2**), que es una medida de dispersión de los datos de un conjunto promedio, y por lo tanto una medida de la reproducibilidad en las caracterizaciones realizadas.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

donde x_i es el dato i y n el número de datos en el conjunto.

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (2)$$

$|x_i - \bar{x}|$ es el valor absoluto de la diferencia entre cada dato y la media, es la media del conjunto de datos.

Evaluación del ICA. Para este objetivo el procedimiento es el siguiente: (i) Ponderación de parámetros, primero se identifican y se establece la ponderación para cada parámetro con base en los términos establecidos

por la SEMARNAT (DGEIA, 2011, León-Viscaíno, 2011). La ponderación para cada parámetro se muestra en la Tabla 4. (ii) Evaluación de Índice de Calidad de Agua empleando la metodología para la evaluación de ICA, **Ec. (3)**:

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

donde I_i es el índice de calidad de agua del parámetro i , W_i el coeficiente de ponderación, y n es el número de parámetros.

Tabla 4. Coeficiente de ponderación e índice de calidad de agua para cada parámetro

Parámetro	Coeficiente de Ponderación	Expresión para la evaluación del índice de calidad de agua para cada parámetro
pH	1.0	$I_{pH} = 10^{0.2335pH+0.44}, pH < 6.7$ $I_{pH} = 100, 7.3 < pH > 6.7$ $I_{pH} = 10^{4.22-0.293pH}, pH > 7.3$
Sólidos disueltos	0.5	$I_{SDT} = 109.1 - 0.0175(SD), mg L^{-1}$
Conductividad eléctrica	2.0	$I_{CE} = 540CE^{-0.379}, \mu S cm^{-1}$
Dureza	1.0	$I_{Dureza} = 10^{1.974-0.00174(DT)}, mg L^{-1}$
Nitratos	2.0	$I_{NO3} = 162.2NO3^{-0.343}, mg L^{-1}$
Oxígeno disuelto	5.0	$I_{OD} = \frac{OD}{OD_{sat}} \times 100$
DQO	5.0	$I_{DQO} = 0.1DQO$
Criterios para considerar en el cálculo del ICA: <ul style="list-style-type: none"> ☒ Cuando los SDT sean menores a 520 mg L⁻¹, se asigna un valor al ICA=100, y para concentraciones de 6234 mg L⁻¹ se asigna un ICA de 0. ☒ Para una CE menor a 85.6 mS/cm se asigna un ICA de 100, y para valores de 2500 mS/cm se asigna un ICA de cero. ☒ Para nitratos, se asigna un valor de ICA de 100 para concentraciones menores a 4.097 mg L⁻¹. ☒ Para OD_{Sat} es de 14.6 mg L⁻¹ a 0°C, la concentración disminuye al incrementar la temperatura. 		

A continuación, se describe el índice de calidad de agua de los parámetros considerados para la evaluación del ICA, ver Figura 20.

- El índice de calidad de agua del parámetro pH (I_{pH}) evalúa el grado de acidez o alcalinidad del agua. El pH es un factor importante para establecer la química y/o toxicidad del agua. El valor de pH de agua influirá en la capacidad de disolución de especies químicas que pueden ser o no dañinas para el ser humano. Un ejemplo de esto, a pH ácidos la disolución de metales pesados se favorece y a pH alcalinos, se incrementa la formación de especies tóxicas como amonio. Para el pH, el coeficiente de ponderación de 1.0, ver Tabla 4. Para garantizar la calidad y seguridad de agua, el pH debe mantenerse dentro de un rango adecuado (generalmente entre 6.5-8.5, NOM-127-SSA1-2021 (NOM-127-SSA1-2021).
- El índice de calidad de agua para el parámetro de sólidos disueltos totales (I_{SDT}) cuantifica la concentración tanto de especies inorgánicas (calcio, magnesio, potasio, sodios, carbonatos, bicarbonatos, nitratos, cloruros y sulfatos) como materia orgánica que se encuentra disuelta en el agua. Las fuentes de los SDT se atribuyen a la erosión natural de suelos, la descomposición de materia orgánica, la actividad industrial, la agricultura y la contaminación urbana. Los límites permisibles para SDT es menor 1000 mg L^{-1} de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021 (NOM-127-SSA1-2021).
- El índice de calidad de agua de conductividad eléctrica (I_{CE}) está relacionado con la presencia de sustancias capaces de conducir corriente eléctrica. La evaluación de la CE permite identificar fuentes de contaminación, intrusión de cuerpos salinos y la dinámica química del agua. Altos niveles de conductividad eléctrica pueden afectar el sabor, el olor y la apariencia del agua. Valores de CE dentro $400\text{-}800 \text{ mS cm}^{-1}$ pueden garantizar la calidad de agua.
- El índice de calidad de agua de dureza (I_{Dureza}) evalúa la concentración de ciertos minerales, principalmente calcio y magnesio, disueltos en el agua. La presencia de minerales no es considerada como contaminación, sino más bien como una característica mineral del agua. Los valores límites permisibles de dureza son mayores a 500 mg L^{-1} , NOM-127-SSA1-2021 (NOM-127-SSA1-2021).
- El índice de calidad de agua de nitratos (I_{NO_3}) para agua potable evalúa la concentración de nitratos disueltos en el agua. Los nitratos son compuestos químicos que contienen nitrógeno y oxígeno en

forma de anión NO_3^- . Los iones nitrato pueden estar presentes en el agua debido a la escorrentía agrícola, la lixiviación de fertilizantes, el estiércol animal, los sistemas sépticos y el vertido de aguas residuales. La ingesta de agua con niveles elevados de nitratos puede afectar la salud de la población, ya que afecta el transporte de oxígeno en la sangre. Los valores límites permisibles de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021 (NOM-127-SSA1-2021) son 11 mg L^{-1} .

- El índice de calidad de agua de oxígeno disuelto (I_{OD}) mide la cantidad de oxígeno presente en forma disuelta en el agua. El oxígeno disuelto es esencial para garantizar la vida acuática, ya que es utilizado por los organismos acuáticos para respirar y llevar a cabo procesos metabólicos. Por lo tanto, el monitoreo del oxígeno disuelto en el agua potable es importante para garantizar la salud y la viabilidad de los ecosistemas acuáticos. El valor para oxígeno disuelto para una fuente de agua aceptable que debe ser mayor o igual a 4.0 mg L^{-1} .
- El índice de calidad de agua de la demanda química de oxígeno (I_{DQO}) es una medida de la cantidad de oxígeno requerida para oxidar y/o descomponer la materia orgánica presente y las sustancias susceptibles a reacciones de óxido-reducción. La DQO es una medida indirecta de la cantidad de contaminantes orgánicos presentes en el agua. La evaluación de la DQO en el agua puede indicar la presencia y la concentración de contaminantes orgánicos, como materia vegetal en descomposición, residuos industriales, productos químicos y otros compuestos orgánicos nocivos. Altos niveles de DQO pueden tener impactos negativos en la calidad del agua, incluyendo la reducción de la concentración de oxígeno disuelto, el aumento de la turbidez y la coloración del agua, y la promoción del crecimiento de microorganismos patógenos y algas nocivas. De acuerdo con el valor de la DQO, el agua se puede clasificar como (DGEIA, 2011):
 1. Excelente $DQO < 10 \text{ mg L}^{-1}$
 2. Buena calidad $10 > DQO < 20 \text{ mg L}^{-1}$
 3. Aceptable $20 > DQO < 40 \text{ mg L}^{-1}$
 4. Contaminada $40 > DQO < 200 \text{ mg L}^{-1}$
 5. Fuertemente contaminada $DQO > 200 \text{ mg L}^{-1}$



Figura 20. Índices de Calidad de Agua de los Parámetros.

Resultados

Los resultados de los índices de calidad de agua de los parámetros y el índice de calidad de agua en cada punto de muestreo para las comunidades de estudio: Tingambato, San Ángel de Zurumucapio, San Francisco Pichátaro, Naranja de Tapia Carapan y Carapan se describen y discuten en esta sección.

Tingambato. En las Figuras 21(a) y 21(b) se muestran los valores de los índices de calidad de agua para los parámetros analizados: I_{Dureza} , I_{CE} , I_{NO_3} , I_{pH} , I_{SDT} , I_{OD} , y I_{DQO} . Los valores del I_{pH} y I_{NO_3} indican que los recursos hídricos tienen de excelente a buena calidad. Los valores de pH oscilan entre 6.5 y 7.8, lo que indica que está dentro de los límites máximos permisibles (NOM-127-SSA1-2021) y la concentración de NO_3^- es del orden $3-8 \text{ mg L}^{-1}$, lo cual está por debajo de los límites máximos permisibles (NOM-127-SSA1-2021). Para los parámetros de CE y Dureza, el índice de calidad de agua I_{CE} y I_{Dureza} se ubican en aceptable y contaminada, respectivamente. Es importante destacar que estos dos parámetros están asociados a la presencia de minerales propia de la composición del suelo de Michoacán, y que como tal no representan una fuente de contaminación asociada a las actividades antropogénicas, sino propias de agua mineral.

En relación con la demanda química de oxígeno (COD), ver Figura 21(b), los valores de índice están en el semáforo verde-amarillo que representa calidad aceptable. Los índices de calidad de agua para los parámetros STD y OD corresponden a un agua de buena calidad.

120

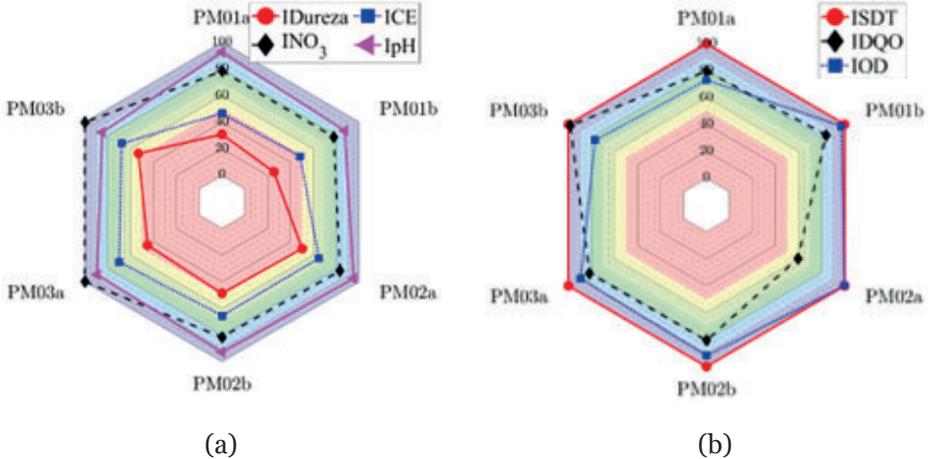
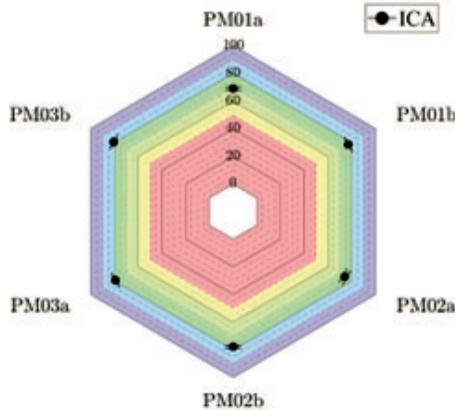


Figura 21. I_{Dureza} , I_{CE} , I_{NO_3} , I_{pH} , I_{SDT} , I_{OD} , y I_{DQO} en la Comunidad de Tingambato.

De acuerdo con el índice de calidad de agua para los recursos hídricos de la comunidad de Tingambato, los valores corresponden a buena calidad (ver Figura 22) para su uso en las actividades humanas. No obstante, para su consumo se recomienda instalar filtros caseros para la eliminación de sales y hervir el agua por 5 minutos para eliminación de patógenos.



121

Figura 22. ICA en los recursos hídricos monitoreados en la Comunidad de Tingambato.

San Ángel de Zurumucapio: En las Figuras 23 (a) y 23 (b) se muestran los valores de los índices de calidad de agua para los parámetros analizados: I_{Dureza} , I_{CE} , I_{NO_3} , I_{pH} , I_{SDT} , I_{OD} , y I_{DQO} . Como se puede observar, I_{Dureza} , I_{CE} y I_{pH} se ubican en el semáforo amarillo-rojo (40-60), que representa una calidad de agua contaminada, ver Figura 23 (a). Los valores de pH (8.59-9.26), CE (444-450 $mS\ cm^{-1}$) y Dureza (superiores a 300 $mg\ L^{-1}$) están en el límite superior de los valores máximos permisibles (NOM-127-SSA1-2021) y esto proporciona un olor y sabor desagradable del agua. La causa de estos valores se atribuye a características naturales del agua. En relación con la demanda química de oxígeno, DQO (ver Figura 23 (b)) los valores de índice, en los puntos de muestreo PM03 y PM04, están en el semáforo amarillo-rojo (50-40) que representa calidad contaminada. Esto se puede atribuir a que estos recursos son de uso directo para lavado de manos y ropa en la comunidad (ver Figura 12), así como expuestos a la contaminación del ambiente. Los índices de calidad de agua para los parámetros, I_{NO_3} , I_{SDT} y I_{OD} , corresponden a un agua de buena calidad. La calidad de los recursos hídricos en San Ángel de Zurumucapio son aptos para

el uso de actividades de la población. No obstante, se para consumo la instalación filtros caseros para la eliminación de sales e incluir un proceso de desinfección para eliminación de patógenos. De acuerdo con el índice de calidad de agua para los recursos hídricos de San Ángel de Zurumucapio, los valores corresponden a una buena-aceptable calidad, (80-70) ver Figura 24. Mientras que, los puntos PM03 y PM04, que corresponden a Pilas de uso directo presentan valores de ICA entre 60-70.

122

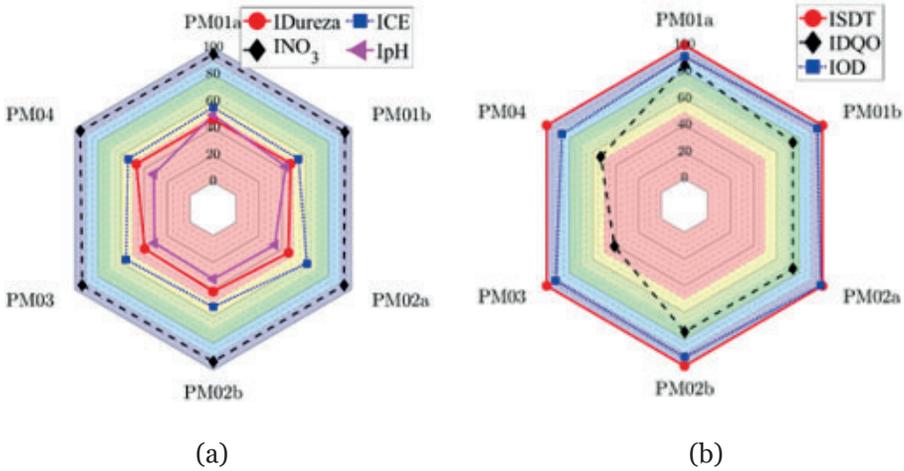


Figura 23. I_{Dureza} , I_{CE} , I_{NO_3} , I_{pH} , I_{SDT} , I_{OD} , y I_{DQO} en la Comunidad de San Ángel de Zurumucapio.

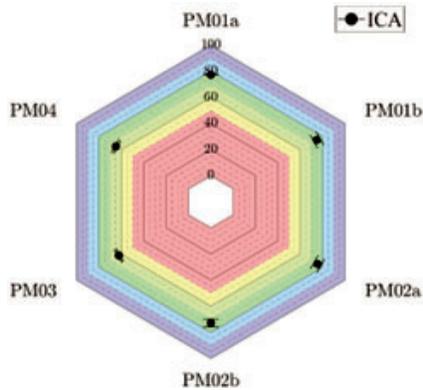


Figura 24. ICA en los recursos hídricos monitoreados en la Comunidad de San Ángel de Zurumucapio.

San Francisco Pichátaro. En las **Figuras 25(a)** y **25(b)** se muestran los valores de los índices de calidad de agua para los parámetros analizados: I_{Dureza} , I_{CE} , I_{NO_3} , I_{pH} , I_{SDT} , I_{OD} , y I_{DQO} . En la Figura 25 (a) se observa que I_{Dureza} y I_{CE} se ubican en el semáforo amarillo que representa una calidad de agua aceptable con característica mineral, la concentración de Ca y Mg es del orden de 80-140 mg L⁻¹ y los valores de CE del orden 300 mS cm⁻¹. En relación con la demanda química de oxígeno, I_{DQO} (ver Figura 25 (b)) los valores de índice, en el punto de muestreo PM01, están en el semáforo amarillo que representa calidad contaminada. Esto se puede atribuir a que, en este punto, el manantial es de uso directo para el sector pecuario lo que provoca la transferencia de materia orgánica y con ello contaminación. Los índices de calidad de agua para los parámetros, I_{NO_3} , I_{pH} , I_{SDT} y I_{OD} corresponden a un agua de buena calidad.

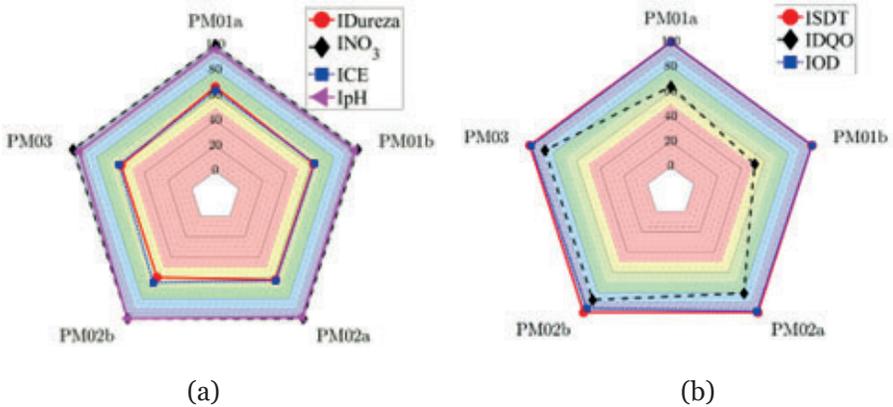


Figura 25. I_{Dureza} , I_{CE} , I_{NO_3} , I_{pH} , I_{SDT} , I_{OD} , y I_{DQO} en la Comunidad de San Francisco Pichátaro.

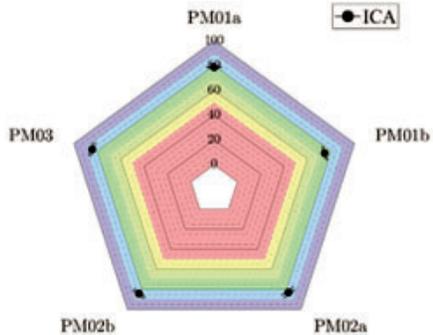


Figura 26. ICA en los recursos hídricos monitoreados en la Comunidad de San Francisco Pichátaro.

De acuerdo con el índice de calidad de agua para los recursos hídricos de San Francisco Pichátaro, los valores corresponden a una buena-aceptable calidad, ver Figura 26, para uso de la comunidad.

124

Naranja de Tapia. En las Figuras 27a y 27b se muestran los valores de los índices de calidad de agua para los parámetros analizados: I_{Dureza} , I_{CE} , I_{NO_3} , I_{pH} , I_{SDT} , I_{OD} , y I_{DQO} . En la Figura 27 (a) se observa que para el PM01 (Pozo), I_{Dureza} y I_{NO_3} se ubican en el semáforo amarillo que representa una calidad de agua aceptable con característica mineral. La concentración de Ca y Mg es del orden de 110 mg L^{-1} y los valores de NO_3^- del orden 3 mg L^{-1} , estos valores están por debajo de los límites máximos, por lo que cumplen con la NOM (NOM-127-SSA1-2021). En relación con I_{CE} , I_{pH} , I_{SDT} , I_{OD} , y I_{DQO} , los valores de calidad se ubican en la región de buena a excelente (80-100). El ICA para el pozo que abastece a la comunidad de Naranja tiene un valor de 92, lo que indica que el agua puede ser usada e incluso para consumo de la comunidad.

Para la laguna de Naranja de Tapia (PM02, PM03 y PM04), los valores de los índices de calidad de agua para los parámetros I_{Dureza} , I_{NO_3} , I_{pH} y I_{DQO} se ubican en la región de recurso contaminado. La presencia de iones nitrato, cationes Ca y Mg y material susceptible a ser oxidado se atribuye a la escorrentía agrícola y pecuaria. Los índices de calidad de agua para los parámetros los valores de los índices de calidad de agua para los parámetros analizados: I_{CE} , I_{SDT} y I_{OD} corresponden a un agua de buena calidad. La laguna de Naranja de Tapia tiene un índice de calidad regular lo que implica menos diversidad de organismos acuáticos y aumento del creci-

miento de las algas (ver Figura 28). Para la laguna de Naranja de Tapia, es importante considerar algún proceso biofiltración.

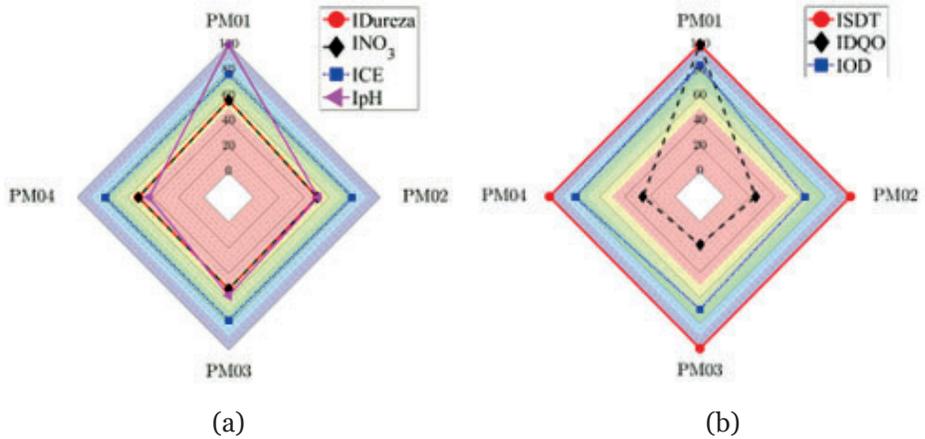


Figura 27. I_{Dureza} , I_{CE} , I_{NO_3} , I_{pH} , I_{SDT} , I_{OD} , y I_{DQO} en la Comunidad de Naranja de Tapia.

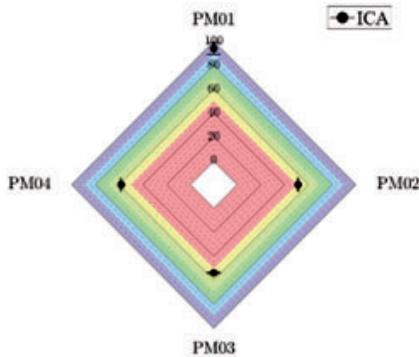


Figura 28. ICA en los recursos hídricos monitoreados en la Comunidad de Naranja de Tapia.

Carapan. En las Figuras 29 (a) y 29 (b) se muestran los valores de los índices de calidad de agua para los parámetros analizados: I_{Dureza} , I_{CE} , I_{NO_3} , I_{pH} , I_{SDT} , I_{OD} , y I_{DQO} . En la Figura 29 (a) se puede observar que el I_{Dureza} se ubican en el semáforo verde-amarillo que representa una calidad de agua aceptable-contaminada, ver Figura 29 (a). La dureza se puede atribuir a características naturales de un agua mineral. En relación con la demanda química de oxígeno, COD (ver Figura 29 (b)) los valores de índice están en el semáforo azul que representa calidad de agua buena. Los índices de calidad de agua para los parámetros I_{pH} , I_{SDT} y I_{OD} corresponden a un agua de excelente calidad. De acuerdo con el índice de calidad de agua para los recursos hídricos de Carapan, los valores corresponden a una buena calidad de agua, ver Figura 30. El recurso hídrico que abastece a la comunidad es apto para su uso en actividad de la comunidad, para su consumo se recomienda instalar filtros caseros para la eliminación de sales

126

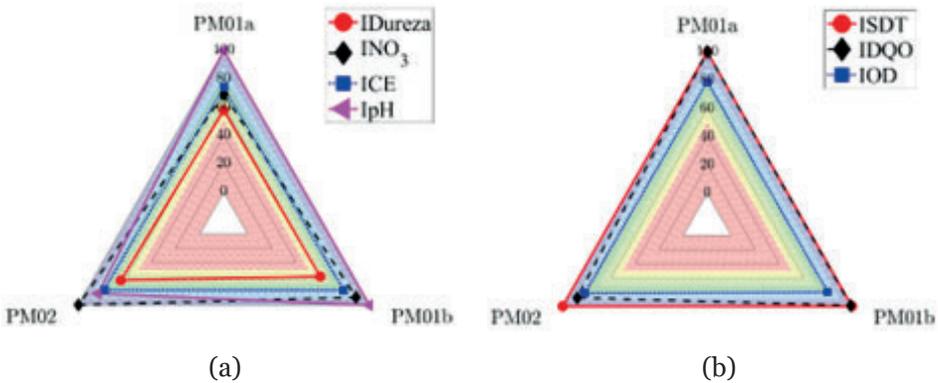


Figura 29. I_{Dureza} , I_{CE} , I_{NO_3} , I_{pH} , I_{SDT} , I_{OD} , y I_{DQO} en la Comunidad de Carapan.

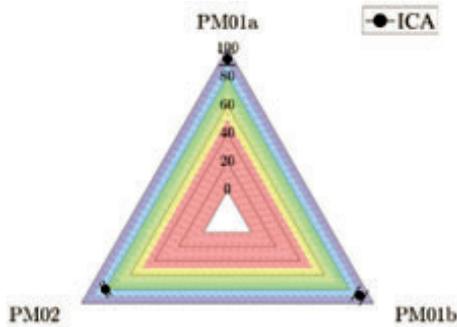


Figura 30. ICA en los recursos hídricos monitoreados en la Comunidad de Carapan.

Evaluación de metales pesados en recursos hídricos

La contaminación por metales pesados de las fuentes de agua se ha convertido en una de las principales preocupaciones medioambientales, a nivel global (Zamora y col., 2021). Esta contaminación amenaza tanto a los ecosistemas acuáticos como a la salud humana. La contaminación por metales pesados en el medio acuático va en aumento debido a la industrialización, el cambio climático y la urbanización. Entre las fuentes de contaminación son las descargas ilegales de los residuos mineros, de lixiviados de vertedero, de las aguas residuales municipales e industriales, de la escorrentía urbana y de fenómenos naturales como las erupciones volcánicas, la meteorización y la abrasión de rocas (Singh y col., 2024). Los iones de metales pesados son tóxicos, potencialmente cancerígenos y pueden bioacumularse en los sistemas biológicos. Los metales pesados pueden causar daños en diversos órganos, como el sistema neurológico, el hígado, los pulmones, los riñones, el estómago, la piel y el aparato reproductor, incluso a bajos niveles de exposición (Hama y col., 2023).

Tabla 5. Análisis de metales pesados en los recursos hídricos de las comunidades consideradas

Recurso hídrico	Pb ²⁺ , mg L ⁻¹	Cd ²⁺ , mg L ⁻¹	Cr ⁶⁺ , mg L ⁻¹
Tingambato PM ₃	(0.025)	<0.02 (0.005)	0.001(0.05)
San Ángel de Zurumucapio PM ₀₁	(0.025)	<0.02 (0.005)	0.002(0.05)
Pichátaro PM ₀₃	(0.025)	<0.02 (0.005)	0.001(0.05)
Naranja de Tapia PM ₀₁	0.001 (0.025)	<0.02 (0.005)	0.001(0.05)
Naranja de Tapia PM ₀₃	0.004 (0.025)	<0.02 (0.005)	0.001(0.05)
Carapan PM ₀₁	0.002 (0.025)	<0.02 (0.005)	0.003(0.05)

Con el propósito de analizar la concentración de metales pesados en recursos hídricos, se evaluó la concentración de metales pesados Pb²⁺, Cd²⁺ y Cr⁶⁺, en los recursos hídricos muestreados en las comunidades rurales de la Meseta Purépecha: Tingambato, San Ángel de Zurumucapio, Pichátaro, Naranja de Tapia y Carapan. Los resultados se muestran en la Tabla 5 y son comparados con los límites máximos permisibles dispuestos en la NOM-127-SSA1-2021 indicados entre paréntesis (NOM-127-SSA1-2021).

Para análisis de metales pesados se emplearon métodos estandarizados Hatch. Para el plomo se empleó el método extracción rápida en columna de Plomo TM (8317), para cadmio: LCK308 Cadmio 0.02–0.30 mg/L (LCK308) y para el cromo: USEPA1 1,5-Difel-carbahidrazida (8023).

Los resultados obtenidos indican que los valores de Pb²⁺ y Cr⁶⁺ están por debajo de los límites permisibles de calidad agua potable para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-2021). Mientras que, para el Cd²⁺ los valores obtenidos están por debajo de límite de detección del método empleado LCK308 (<0.02 mg L⁻¹).

Foro comunal

La evaluación de la calidad de agua en diferentes comunidades Tingambato, San Ángel Zurumucapio, Carapan, Naranja de Tapia y San Francisco Pichátaro de la Meseta Purépecha se llevó a cabo con la finalidad de proveer información a las comunidades para el desarrollo de estrategias para la gestión integral de recursos hídricos. Los resultados se compartieron con los representantes comunales de las comunidades autogestivas. Esto se desarrolló en el Foro para la gestión del agua, la vivienda y la energía en

comunidades indígenas de Michoacán celebrado el 21 de junio de 2024 en la sede Kananguio de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán (UIIM), ver Figura 31.

Promueve UIIM uso del agua y energía alternativa en comunidades indígenas #Educación

Posted on 17/06/2024 by Redacción Autor



Promueve UIIM uso del agua y energía alternativa en comunidades indígenas

• Mediante el "Foro para la gestión del agua, la vivienda y la energía en comunidades indígenas de Michoacán"



Figura 31. Imágenes del Foro para la gestión del agua, la vivienda y la energía en comunidades indígenas de Michoacán celebrado el 21 de junio de 2024 en la sede Kananguio de la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán (UIIM).

Tomadas: <https://www.facebook.com/UniversidadInterculturalIndigena/videos/inauguraci%C3%B3n-del-foro-para-la-gesti%C3%B3n-del-agua-la-vivienda-y-la-energ%C3%ADa-en-comun/473423365232028/>.

Dentro de las experiencias compartidas en el foro comunal se engloban en los siguientes puntos:

- La preocupación por el grado de pérdida de los recursos hídricos, principalmente manantiales. Y que en lugares dentro de la comunidad han generado escasez del recurso y los habitantes han tenido que regresar a prácticas como el uso de lavaderos comunitarios y recolección del agua de lluvia.
- La calidad de agua de los manantiales ha sido alterada, y esto se atribuye principalmente a las prácticas agrícolas existentes, y al uso desproporcionado de agroquímicos en los cultivos
- La cantidad de agua extraída de los pozos para abastecer a las comunidades cada vez es mayor y por lo tanto se extrae a mayor profundidad, lo que pone en riesgo la calidad de agua debida al contenido de metales pesados, o de altas concentraciones de minerales
- La red de distribución de agua municipal es obsoleta y no se ha dado mantenimiento en décadas.
- En las comunidades se ha instalado sistemas de saneamiento. No obstante, la mayoría de las plantas de tratamiento de agua residual no se encuentran operando, y si lo están no se ha dado el mantenimiento adecuado para garantizar la calidad de agua tratada, de acuerdo con la normatividad vigente.

130

Los estudios de calidad de agua en diferentes comunidades han mostrado que los recursos hídricos poseen de aceptable a buena calidad y no se identificó valores fuera de los límites permisibles de metales pesados, como plomo, cadmio y/o cromo. No obstante, tenemos el reto de realizar análisis de agua más detallado, que no permita evaluar la presencia de pesticidas, herbicidas y plaguicidas, así como contaminantes emergentes, como fármacos, hormonas, solventes, cosméticos, entre otros. Esto permitirá obtener información para, que caso de estar presente este tipo de sustancia se incorporen tecnologías para la potabilización del agua, y con ello garantizar la salud de la población.

Es importante mencionar que la metodología implementada puede ser reproducible para otras comunidades y con ello tener información sobre la calidad de agua de regiones de alta vulnerabilidad. En las Figuras 33-37 se muestran los recursos visuales elaborados para la divulgación de los resultados de calidad de recursos hídricos en las comunidades.



Figura 33. Recurso visual para la comunidad de Tingambato.



Figura 34. Recurso visual para la comunidad de San Ángel Zurumucapio.



Figura 35. Recurso visual para la comunidad de San Francisco Pichátaro.



Figura 36. Recurso visual para la comunidad de Naranja de Tapia



132

Figura 37. Recurso visual para la comunidad de Carapan

Para la concientización de la importancia de agua en la vida del ser humano y reconocimiento de su vinculación con el ambiente, los estudiantes de la Maestría de Educación Ambiental de la UIIM participó en la Feria del Agua en Tingambato, donde los niños de preescolar y primaria, así como jóvenes de secundaria y nivel medio superior realizaron actividades referentes al ciclo del agua, importancia del agua en los bosques forestales, implementación de ecotecnología para migrar hacia formas de vida sostenibles, y eliminación de contaminantes en agua. En la Figura 32 se muestran algunas imágenes de este encuentro, que sin duda será el parateguas para el desarrollo, implementación y seguimiento de Programas de Educación Ambiental.



Figura 32. Imágenes de la Feria del Agua celebrada el 5 de Noviembre del 2024 en la Casa de Cultura en Tingambato (Imágenes propiedad del Ing. Hugo Bautista estudiante de la Maestría en Educación Ambiental de la UIIM).

Conclusiones

La gestión de los recursos hídricos en las comunidades debe priorizarse en los niveles de gobierno comunal, local, regional, estatal y nacional. La planeación, formulación, desarrollo, incorporación y seguimiento de las estrategias deben emerger desde la comunidad para garantizar el éxito, la participación e inclusión de la comunidad permitirá generar alternativas justas, equitativas y vivibles que son los fundamentos de desarrollo sostenible. En este sentido, la educación en materia ambiental será el pilar fundamental para sostener las estrategias, a través de la concientización, sensibilización y el reconocimiento de la vinculación entre el ser humano y el ambiente.

Es importante destacar que la evaluación de la calidad de agua permitirá obtener información relevante sobre el estado de los recursos hídricos de las comunidades purépechas, y que esta información permita el desarrollo de estrategias para reducir la vulnerabilidad e incrementar la resiliencia, ante la escasez del recurso hídrico y cambio climático, promoviendo formas de vida más sostenibles en las comunidades.

Agradecimientos

S. Orozco agradece al CONAHCYT por la beca Posdoctoral de Consolidación M1 y M2 (I1200/320/2022). Este trabajo recibió apoyo del ICTI Proyectos PICIR23-004 y FCCHTI23-ME-4.1.-0027, así como de la UNAM-DGAPA-PAPIIT Proyecto IA103623 y UNAM-DGAPA-PAPIME Proyecto PE109024.

Referencias

- Acheampong, Ernest Nti, Swilling, Mark, Urama, Kevin. (2016). Developing a framework for supporting the implementation of integrated water resource management (IWRM) with a decoupling strategy. *Water Policy* 18:(6), 1317–1333. <https://doi.org/10.2166/wp.2016.155>
- Asociación Mexicana para la Correcta Hidratación AC (2022). Calidad de Agua. <https://aguaenmexico.com/calidad-del-agua>
- Ávila García (2020). Escasez del agua en una región indígena: Caso de la Meseta Purépecha. El Colegio de Michoacán.
- Blanca Estela Lemus Ruiz (2020). Agua y salud: Un enfoque sustentable. <http://www.geocities.ws/congresoprograma>
- Capodaglio, Andrea G., Ghilardi, Paolo, Boguniewicz-Zablocka, Joanna. (2016) New paradigms in urban water management for conservation and sustainability. *Water Practice and Technology* 11(1): 176–186. <https://doi.org/10.2166/wpt.2016.022>
- Chen, Yuqing, Vardon, Michael, Accounting for water-related ecosystem services to provide information for water policy and management: An Australian case study. *Ecosystem Services* 69, 101658. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101658>.
- Chidiac S, El Najjar P, Ouaini N, El Rayess Y, El Azzi D. (2023) A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives. *Rev Environ Sci Biotechnol*. 22(2), 349-395. <https://doi: 10.1007/s11157-023-09650-7>.
- Chinmayi, B.Y., Ramesh, H. Evaluation of stakeholder knowledge and practices of water use management strategy: Observations from a questionnaire survey in Southern India. *Heliyon*, e38466. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38466>
- Conagua (2022). Calidad de Agua. www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua.

- Comisión Nacional del Agua (2014). Estadísticas del Agua en México. Dirección General de Estadística e Información Ambiental (2011). Agua en México. www.gob.mx/semarnat.
- FAO. Diálogo de Roma: Soluciones y sinergias y se aportan contribuciones prácticas. (2023) <https://www.fao.org/water/es/>
- Gerasidi, A., Apostolaki, S., Manoli, E., Assimacopoulos, D., Vlachos, E. (2009). Towards the formulation of a new strategy of water resource management for urban areas achieved through participatory processes. *Urban Water Journal* (3), 209–219. <https://doi.org/10.1080/15730620902781442>
- Gopar-Merino, L. F., Velázquez, A. (2016). Componentes del paisaje como predictores de cubiertas de vegetación: estudio de caso del estado de Michoacán, México, *Investig. Geográficas, Boletín del Inst. Geogr.* 90, 75–88. doi: 10.14350/rig.46688.
- Gudiño-Sosa, Luis Fernando, Escalera-Gallardo, Carlos, Cruz-Cárdenas, Gustavo, Moncayo-Estrada, Rodrigo, Silva-García, José Teodoro, Flores-Magallón, Rebeca, Damián-Arroyo, Miriam, & Chávez-Tinoco, Marco Antonio. (2022). Evaluación de la calidad del agua en un río subtropical y tributarios utilizando índices fisicoquímicos y macroinvertebrados acuáticos. *Hidrobiológica*. 32(1), 33-50. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbh/hidro/2022v32n1/gudino>
- Hama, A., Mustafa, F. S., Omer, K. M., Hama, S., Hamarawf, R. F., and Rahman, K. O. (2023). Heavy metal pollution in the aquatic environment: efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: a review. *RSC advances* 13(26):17595–17610.
- INEGI (2010). Michoacán de Ocampo. <https://cuentame.inegi.org.mx>.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2004). http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/participacion-de-la-ciudadania/-/document_library_display/3DCVB-B3LTRP3/view/105409131
- León-Viscaíno, Luis (2011). Índices de Calidad de Agua, Forma de Estimarlos y Aplicarlos en la Cuenca Lerma-Chapala. www.gob.mx/semarnat.
- Mendoza-Mora, F., Cruz Cárdenas, G., Silva, J. T., Ochoa-Estrada, S., Álvarez-Bernal, D. (2023). Evaluation of the physical and chemical quality and trace elements of water in Cupatitzio River, Michoacán. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*. 14(5), 364–412. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-14-05-09>

- Mendoza Ramírez; R., Suárez Alcántara, K., Silva Casarín, R., Domínguez Mora, R., Benítez, S., Carrizosa Elizondo, E. (2023) Analysis of Water Quality Index in Lake Zirahuén, Michoacán, Mexico. Proceedings of the 40th IAHR World Congress (Vienna, 2023)
- NOM-127-SSA1-2021 (2021). Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.
- NOM-230-SSA1-2002 (2002) Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo.
- NMX-AA-030/1-SCFI-2012 (2012) Norma mexicana que establece un método para medir la demanda química de oxígeno (DQO) en el agua.
- Objetivos para el Desarrollo Sostenible (2015) Programa Nacional de las Naciones Unidas. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- Red Nacional de Medición de Calidad del Agua. (2024). RENAMECA-Conagua Comisión Nacional del Agua. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/resultados-de-la-red-nacional-de-medicion-de-calidad-del-agua-renameca?idiom=es>
- Rodríguez, I. (2022). Contaminada, 59.1 % del agua superficial de México. www.eleconomista.com.mx/politica
- Saavedra Aguilera, Antonio (2021). Análisis del impacto del uso de agroquímicos convencionales en la calidad del agua de los mantos acuíferos en el Municipio de Tingambato, Michoacán. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, UMSNH.
- SEMARNAT (2011). Indicadores de calidad de agua. www.semarnat.gob.mx.
- Singh, V., Ahmed, G., Vedika, S., Kumar, P., Chaturvedi, S. K., Rai, S. N., Vamanu, E., and Kumar, A. (2024). Toxic heavy metal ions contamination in water and their sustainable reduction by eco-friendly methods: isotherms, thermodynamics and kinetics study. *Scientific Reports* 14(1):7595.
- Toscano Reyes, C.A., Alfaro Cuevas Villanueva, R., Vázquez, G., Cortés Martínez, R., Bocanegra Martínez, D.M. (2022). Evaluación de la calidad del agua de manantiales ubicados en la comunidad El Platanal, Michoacán, México. *Ciencia Nicolaita* (85) <https://doi.org/10.35830/cn.vi85.658>

ABASTECIMIENTO DE AGUA EN ZONAS RURALES Y ECOTECNOLOGÍAS RELACIONADAS

Benjamín Villalobos Castañeda

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México.
bvillalobos@enesmorelia.unam.mx

Resumen

En este capítulo se presenta información consultada en varias fuentes, que el autor considera básica sobre el tema agua, dicha información puede permitir que el lector tenga una mejor comprensión de la problemática y soluciones al respecto, está dirigido al público en general, en especial a todas aquellas personas interesadas en el agua, en él, se expone de manera general cómo se podría lograr un mejor aprovechamiento del agua en zonas rurales mediante el uso de ecotecnologías, el capítulo se divide en dos subtemas, el primero titulado “La importancia del agua” donde se hace notar la relevancia del agua como recurso, para después profundizar sobre las fuentes naturales de agua, la problemática alrededor del recurso, su contaminación, la manera en que se gestiona, el significado de su calidad, su relación con la salud y el medio ambiente, así como los principales usos que se le dan, en el segundo subtema titulado “Ecotecnologías para el abastecimiento y purificación de agua”, se presenta de manera breve una explicación sobre dos de las principales ecotecnologías relacionadas con el agua, que se podrían considerar básicas para tener agua en una vivienda: 1) El Sistema de Captación para Aprovechamiento de Agua de Lluvia (SCALL) y 2) Los filtros purificadores de agua, la primera desarrollada para abastecer de agua a una vivienda y la segunda para purificar el líquido, eliminar contaminantes y obtener agua limpia y segura para las personas.

Palabras clave: agua, calidad, rural, comunidades, ecotecnologías.

La importancia del agua

El agua desempeña un papel vital en la salud pública, el crecimiento económico y la sostenibilidad del medio ambiente, solo alrededor del 0.01 por ciento del agua del planeta es potable, cantidad que se reduce año tras año debido a la contaminación, 884 millones de personas en el mundo no tienen acceso a agua potable segura y 2.6 mil millones de personas (40% de la población mundial) carecen de acceso a saneamiento básico (ONU-Habitat, 2021).

138 Las formas de vivir han cambiado drásticamente en los últimos años, es notable el crecimiento de los pueblos y la urbanización, lo que ha provocado una mayor demanda en la forma de operar y administrar los recursos hídricos, financieros y humanos, por lo que se requiere de una operación óptima, además de conocimientos específicos por parte de integrantes, servidores y representantes de comunidades indígenas, pueblos originarios, organizaciones sociales, comités, colectivos, redes y personas independientes que trabajan en la administración, distribución, saneamiento, siembra y defensa del agua y el territorio (Comité Pozo Rural San Lucas Amalinalco et al., 2024).

Fuentes naturales de agua

Las principales fuentes de donde se obtiene agua para uso humano se clasifican según el origen, se reconocen 3 fuentes principales, el agua superficial (ríos y lagos), también agua subterránea (manantiales o acuíferos), así como el agua meteórica (lluvia). De acuerdo con el Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A. C. y GIZ, 2017; el territorio por donde escurre el agua hacia una corriente principal y luego hacia un punto común de salida es la cuenca hidrográfica (Figura 1), es la unidad geográfica funcional más adecuada para gestionar el agua con una perspectiva de sustentabilidad.

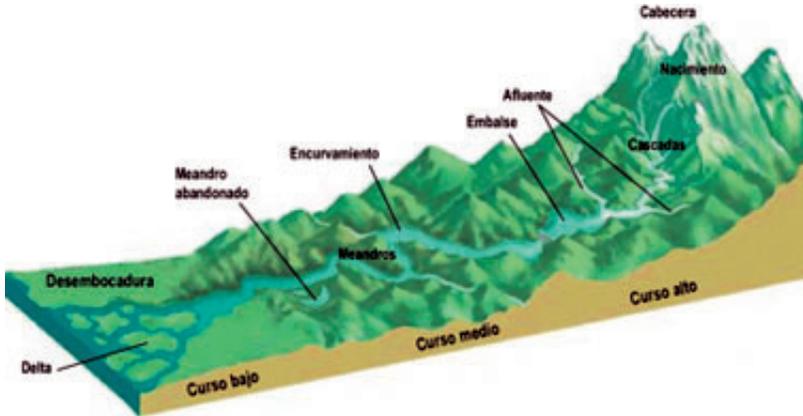


Figura 1. Esquema de una cuenca hidrográfica. Tomado de: Saavedra y Heredia, 2014.

El ciclo hidrológico es el proceso de circulación de agua entre la atmósfera, la tierra y el mar. Según la Comisión Nacional del Agua, 2021; una proporción importante de la precipitación pluvial regresa a la atmósfera en forma de evapotranspiración, mientras que el resto escurre por corrientes y cuerpos de agua siguiendo la conformación del terreno, constituyendo las aguas superficiales o bien, se infiltra al subsuelo como agua subterránea.

139

Problemática del agua

El futuro del agua está determinado por diversas dimensiones específicas, que pueden ser naturales (cambio climático, uso del suelo, recursos hídricos, ecosistemas), sociales (población, gobernanza, valor y estilos de vida) y económicas (usos del agua para la agricultura, los hogares, la energía y la manufactura en combinación con el desarrollo económico y tecnológico). Se prevé que el uso doméstico del agua, que representa aproximadamente 10 por ciento de las extracciones en el ámbito mundial, aumente de manera significativa durante el periodo 2010-2050 en casi todas las zonas del mundo (Burek et al., 2016; Sánchez *et al.*, 2020).

En el año 2021 el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), órgano de las Naciones Unidas encargado de evaluar los conocimientos científicos relativos al cambio climático, publicó

el Informe del Grupo de Trabajo I “Cambio Climático 2021: Bases Científicas”. En dicho informe se explica como las emisiones de GEI producto de las actividades humanas son responsables de un calentamiento de la Tierra de aproximadamente 1.1 °C desde 1850-1900, se prevé que la temperatura mundial promediada durante los próximos 20 años alcanzará o superará un calentamiento de 1.5 °C. Si se llega a un calentamiento global de 1.5 °C, los riesgos climáticos podría suceder un aumento de las olas de calor, se alargarán las estaciones cálidas y se acortarán las estaciones frías. Con un calentamiento global de 2 °C los episodios de calor extremo serían críticos para la agricultura y la salud. El cambio climático altera el ciclo hidrológico y conlleva una mayor intensidad de las precipitaciones e inundaciones asociadas, así como sequías más intensas. Las actividades humanas tienen impacto en el ciclo del agua, modifican la composición química de la atmósfera con la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), afectan el desarrollo económico, social y ambiental, pues todos los sectores de la actividad humana y el funcionamiento de los ecosistemas dependen del agua (IPCC, 2021; Rivera, 2021).

140

Entre los grandes desafíos para la humanidad está garantizar la disponibilidad de agua, la gestión sostenible de esta y el saneamiento para toda la población del planeta. Para 2015, la crisis afectaba ya a 700 millones de personas que no tenían acceso a fuentes mejoradas de agua potable (Sánchez *et al.*, 2020).

Alrededor del 36% de la población mundial (2,400 millones de personas) viven en regiones con escasez de agua y el 52% experimentará una severa escasez de agua hacia el año 2050. El acceso al abastecimiento de agua en las ciudades es limitado, por tal motivo, dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se pueden reconocer dos muy importantes en relación con el agua, el número 6: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos, y el número 11: Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles (ONU-Habitat, 2021).

El agua se considera un recurso que puede limitar el desarrollo económico y social, por lo anterior, se debe cuantificar su disponibilidad y hacer un uso eficiente del mismo. Según Gil Antonio, 2014; el concepto de disponibilidad es la cualidad o condición de aprovechable; es decir, que se puede disponer libremente de ella o que está lista para usarse o utilizarse y en México se recurre la NOM-011-CNA-2000 para determinar la disponibilidad de agua, en esta norma se define a la disponibilidad

de aguas superficiales como: el “valor que resulta de la diferencia entre el volumen medio anual de escurrimiento de una cuenca aguas abajo y el volumen anual actual comprometido aguas abajo”, y la disponibilidad de aguas subterráneas como: el “volumen medio anual de agua subterránea que puede ser extraído de una unidad hidrogeológica para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas”. Así definidas, una disponibilidad nula implica que no pueden concesionarse cantidades adicionales de agua. Es importante el uso eficiente del agua y de su infraestructura, así como la participación activa de los usuarios y un alto sentido de equidad social. De acuerdo con Burek *et al.*, 2016 y Sánchez *et al.*, 2020, se considera que existe escasez cuando se dispone entre 500 y 1 000 m³/año/habitante. La escasez absoluta se presenta cuando la disponibilidad es menor a 500 m³/año/habitante.

En México hay diferencias muy grandes en cuanto a la disponibilidad de agua. Las zonas centro y norte de México son, en su mayor parte, áridas o semiáridas: los estados norteros, (Baja California, Baja California Sur, Coahuila, Chihuahua, Nuevo León, Sonora y Tamaulipas) reciben apenas el 9% del agua renovable al año. En el caso de las entidades del sur-sureste (Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Campeche, Quintana Roo, Yucatán, Veracruz de Ignacio de la Llave y Tabasco) es lo contrario, éstas reciben más de la mitad del agua renovable al año (67.2%), no obstante, sus habitantes tienen menor acceso al vital líquido, pues no cuentan con los servicios básicos, como es agua entubada dentro de la vivienda (Cuéntame INEGI, s.f.)

Contaminación del agua

El término contaminación se refiere a la introducción de cualquier agente químico, físico o biológico cuya presencia o acumulación tiene efectos nocivos en el entorno natural, la salud y el bienestar de las personas, sustancias ajenas al entorno al que se incorporan y afectan la calidad del agua (también pueden afectar al aire y suelo). Se dice que el agua está contaminada cuando los agentes contaminantes repercuten negativamente en su calidad para el consumo humano, para usos posteriores o para el bienestar de los ecosistemas. Dicha contaminación puede ocurrir en cualquier espacio que alberga agua como son los ríos, lagos, acuíferos o incluso el mar. La contaminación proveniente de procesos naturales es mínima en comparación con la contaminación que se genera por las acti-

vidades humanas. Existen varios factores que provocan la contaminación del agua, entre los que se encuentran: el vertido de desechos industriales sin tratamiento, el vertido de desechos municipales (aguas residuales) sin tratar, el aumento en la temperatura del agua que ocasiona la disminución de oxígeno en su composición, la deforestación y erosión del suelo, el uso de pesticidas y fertilizantes, así como depositar desechos sólidos a los cuerpos de agua. Cada año se vierten a los cuerpos de agua millones de metros cúbicos de aguas residuales, descargas municipales, industriales y agrícolas tratadas de forma inadecuada o sin tratamiento alguno. La contaminación del agua tiene un severo impacto en los ecosistemas y en la salud humana. Es preciso reducir los volúmenes y mejorar los procesos de tratamiento, no solo para procurar el bienestar social y la protección ambiental, sino también por razones económicas y de seguridad nacional. En México, las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales (abastecimiento público urbano y rural) y no municipales (otros usos como industria autoabastecida). Según cifras oficiales, se trata el 52.7% de las aguas municipales que se generan, y el 32% de las aguas no municipales. Aunque hay avances es aún insuficiente y existe un volumen indeterminado de aguas contaminadas que no son colectadas, que se pierden en las redes de desagüe o que se descargan de forma ilegal (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A. C. y GIZ, 2017).

Gestión del agua

La actual crisis del agua abarca múltiples dimensiones y en gran medida es el resultado de un sistema de gestión o administración deficiente que no ha generado un sano equilibrio entre la demanda, la disponibilidad y la oferta de los recursos hídricos. El actual modelo de gestión que prevalece en México tiene una perspectiva político-administrativa que no considera la interrelación existente entre el sistema natural, social y productivo, y el ciclo hidrológico que ocurre en las cuencas. Esta gestión fragmentada por sectores, por tipos de uso, por fuentes y otras variantes ha producido resultados que ponen en evidencia la necesidad de reorientarla. Es necesario transitar hacia un modelo de gestión por cuencas que se adapte a los condicionantes físicos y sociales, propicie la preservación de los ecosistemas y busque el equilibrio entre los aprovechamientos, bienes, servicios y funciones del agua con la participación de los actores involucrados: ciudadanos, usuarios, autoridades gubernamentales, expertos, organismos

operadores, etc. La gestión jurídica del agua en México tiene como fundamento lo que dictan tres artículos de la Constitución Política (4°, 27 y 115) y la Ley de Aguas Nacionales. El artículo 4° reconoce que toda persona tiene derecho al acceso, la disposición y el saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado debe garantizar este derecho de forma equitativa y sustentable, y establecer la participación de la Federación, los estados y la ciudadanía para conseguirlo. El artículo 27 señala que las aguas son propiedad de la Nación y sienta las bases para que el Estado regule su aprovechamiento sostenible, con la participación de la ciudadanía y de los tres niveles de gobierno. Especifica que la explotación, el uso o aprovechamiento de los recursos se realizará mediante concesiones otorgadas por el Ejecutivo, con base en las leyes. El artículo 115, por su parte, especifica que los municipios tienen a su cargo los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales. En cuanto a la legislación secundaria, la Ley de Aguas Nacionales (LAN) es el ordenamiento reglamentario del artículo 27 constitucional; regula la distribución y control del agua, y designa a la Comisión Nacional del Agua como el órgano responsable de ejercer la autoridad y administración del agua a nombre del Ejecutivo. La LAN se creó en 1992 y fue reformada casi en su totalidad en 2004. (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A. C. y GIZ, 2017; SEMARNAT y CONAGUA, 2021).

143

Se requiere una Gestión Integral de los Recursos Hídricos para lograr un buen aprovechamiento del agua, es necesario conocer con qué cantidad se cuenta y para qué se utiliza. Es necesario considerar los dos aspectos mencionados anteriormente en la problemática del agua, la disponibilidad y uso eficiente de agua. Al respecto, existen reportes y documentos oficiales que aluden los conceptos de disponibilidad y uso eficiente del agua; sin embargo, la mayoría de estos se centran en lo que sucede en las zonas urbanas dejando al margen lo que ocurre en las zonas rurales. En las comunidades rurales los usuarios dan mayor prioridad a la cantidad que a la calidad. La existencia de una red de distribución de agua para uso doméstico en el cual estén incluidos todos los integrantes de la comunidad es un elemento fundamental para los usuarios, lo que muestra la importancia de la equidad en estas zonas. El recurso hídrico es escaso en el norte y centro del país y abundante en los estados del sureste. Es grave la situación en regiones como el centro y norte del país donde se tienen severos problemas de disponibilidad (Gil Antonio *et al.*, 2014).

En la actualidad existen Sistemas o Comités Autónomos de Agua (CAA), son grupos organizados que prestan el servicio de agua de manera autónoma en diversos pueblos y comunidades a lo largo y ancho del país. Se encuentran particularmente presentes en las comunidades que son consideradas inferiores a la categoría política administrativa de los municipios. Los CAA han surgido como una respuesta al descuido total de las instituciones gubernamentales para garantizar el derecho humano al agua y al saneamiento. Actualmente, ni el gobierno ni las leyes mexicanas reconocen formas de gestión comunitaria como la que se desempeña en los CAA, por lo que constantemente enfrentan dificultades, como a la falta de aquellos recursos que les permitan brindar un mejor servicio (Comité de Agua La Candelaria Tlapala *et al.*, 2024).

Calidad del agua

144

La calidad del agua es un concepto complejo donde se pueden considerar una o varias características del agua tomando en cuenta el uso al que se va a destinar, las características se relacionan con una serie de parámetros físicos, químicos, biológicos y radiactivos, estos parámetros se designan de acuerdo con el tipo de agua de interés, por ejemplo, puede ser para uso doméstico, para consumo humano, para uso recreativo, para riego, etc. Por lo anterior, cuando se evalúa la calidad del agua, los parámetros de interés deben corresponder al tipo de agua estudiada, todo con el fin de proteger la salud humana y el medio ambiente.

De acuerdo con la SEMARNAT y CONAGUA, 2021; la calidad del agua se determina mediante la caracterización física y química de muestras de agua y su comparación con normas y estándares de calidad. De esta forma se puede identificar si el agua es idónea para los requerimientos de calidad asociados a un uso determinado, como por ejemplo el consumo humano o el ambiente, y en su caso, los eventuales procesos de depuración requeridos para la remoción de elementos indeseables o riesgosos. Se reconoce que el deterioro de la calidad del agua puede ocurrir por procesos naturales o antropogénicos.

En México existen Normas Oficiales Mexicanas (NOM), son regulaciones técnicas de observancia obligatoria expedidas por las dependencias competentes, algunas normas están relacionadas con el agua de cuerpos naturales (ríos y lagos), agua residual y residual tratada, además de esas normas, se tiene la NOM-127-SSA1-2021 correspondiente al agua potable

y dice textualmente que el abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades relacionadas con el agua, para lo cual se requiere establecer y mantener actualizados los límites permisibles en cuanto a sus características físicas, químicas, microbiológicas, y radiactivas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua que se entrega al consumidor por los sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados. Esta norma establece los límites permisibles de calidad que debe cumplir el agua para uso y consumo humano.

Agua, salud y medio ambiente

El no tener acceso a fuentes confiables de agua puede generar pobreza, inequidad, enfermedad y muerte. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) reconoce que el derecho al agua y al saneamiento es un derecho esencial para el disfrute de otros derechos, como la salud. Se requiere agua limpia, suficiente, accesible y asequible para reducir la mortalidad infantil y disminuir las enfermedades que se transmiten por el agua. La provisión de los servicios de agua potable y de saneamiento es un factor significativo en la salud de la población, ya que evita su exposición a los agentes patógenos. El acceso a estos servicios es crucial para la reducción de la mortalidad y morbilidad entre la población. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), las enfermedades diarreicas se encuentran entre las primeras causas de muerte de niños menores de cinco años. Asimismo, el agua potable y el saneamiento son imprescindibles en la disminución de enfermedades de transmisión hídrica como la hepatitis viral, la fiebre tifoidea, el cólera, la disentería y otras causantes de diarrea, así como de afecciones resultantes del consumo de componentes químicos tóxicos como el arsénico, los nitratos o el flúor. El 26% de la población rural en México no cuenta con escusado o letrina higiénicos y el 4% defeca al aire libre, lo que favorece el contagio de enfermedades diarreicas. La salud humana es un tema transversal en las cuestiones relacionadas con el agua, por lo que puede ser un motivo clave en la movilización de las comunidades a participar en la conservación de la naturaleza y la gestión ambiental (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A. C. y GIZ, 2017; SEMARNAT y CONAGUA, 2021).

Usos del agua

El agua se utiliza en diferentes actividades de la sociedad, para consumo humano, lavar trastes, higiene, cocinar y otros propósitos. El uso se define según la aplicación del agua en una actividad. Los usos del agua se definen en 2 categorías, uso consuntivo y uso no consuntivo, el primero se refiere a cuando existe un consumo de agua y se presenta una diferencia entre el volumen que se suministra y el volumen que se descarga (ejemplo: agua empleada para riego agrícola), respecto al uso no consuntivo, el agua se utiliza durante una actividad, pero no existe disminución en su volumen (ejemplo: agua empleada para la generación de energía en una hidroeléctrica).

146

En México, el mayor volumen concesionado para usos consuntivos, lo representa el uso agrícola, principalmente en riego, se sabe que del volumen concesionado por municipio para usos consuntivos la fuente principal o predominante es superficial o subterránea. El uso agrícola y el de abastecimiento público representaban en 2020 el 90.4% del volumen concesionado a nivel nacional. El uso abastecimiento público consiste en aprovechar el agua entregada por las redes de agua potable, para el abastecimiento a los usuarios domésticos (domicilios), así como a diversas industrias y servicios. Disponer de agua en cantidad y calidad suficiente para el consumo humano es una de las demandas básicas de la población, pues incide directamente en su salud y bienestar en general. En dicho uso, la fuente predominante es la subterránea con el 56.7% del volumen. El servicio de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales está a cargo de los municipios, generalmente a través de organismos operadores. La cobertura nacional de acceso al agua entubada, y la cobertura nacional de agua entubada en la vivienda o predio era de 96.1% (98% urbana, 89.1% rural). La población urbana cuenta generalmente con una cobertura más elevada que el ámbito rural, las zonas urbanas con servicio de agua se ven favorecidas por la concentración de la población, en contraste con la dispersión de la población rural en múltiples localidades de pequeño tamaño, cabe destacar que existe un incremento en los servicios para el ámbito rural (SEMARNAT y CONAGUA, 2021).

Ecotecnologías para el abastecimiento y purificación de agua

Existen ecotecnologías para resolver la necesidad de agua tanto en zonas urbanas como rurales, con ellas se pretende lograr el abastecimiento de agua, incluyendo su almacenamiento, purificación y desinfección.

En Ortiz-Moreno *et al.*, 2014; se define a la ecotecnología como: “*Dispositivos, métodos y procesos que propician una relación armónica con el ambiente y buscan brindar beneficios sociales y económicos tangibles a sus usuarios, con referencia a un contexto socioecológico específico*”, mencionan que el término ecotecnia también es utilizado como sinónimo de ecotecnología y lo definen como la aplicación práctica de la ecotecnología, es decir, los artefactos, dispositivos y en general los productos ecotecnológicos tangibles. Los autores sugieren una categorización de ecotecnologías de acuerdo con usos finales o tareas específicas de las tecnologías con respecto a la satisfacción de necesidades humanas básicas. La clasificación considera cinco ejes fundamentales para el bienestar humano: agua, energía, vivienda, manejo de residuos y alimentación. En términos operativos, para cada necesidad se puede definir una serie de tareas o usos específicos. Las ecotecnologías, tienen un papel muy importante al atender las necesidades humanas básicas (saneamiento, obtención de agua potable, producción y cocción de alimentos, etc.) en las áreas rurales, brindan una extensa gama de beneficios ambientales locales (recuperar suelos, reducir la contaminación de los cuerpos de agua locales) y globales (reducir emisiones de Gases de Efecto Invernadero a la atmósfera), beneficios a la salud (reducir la contaminación por humo al remplazar fogones por estufas eficientes o eliminar la presencia de patógenos con la instalación de sanitarios ecológicos), beneficios económicos (brindar oportunidades locales para darle valor agregado a los productos, ahorrar dinero al hacer un uso más eficiente del agua o energía).

Las ecotecnologías se diseñan según el contexto de los hogares, los SCALL son diseñados para aprovechar agua de lluvia que tiene buena calidad para varios usos y abastecer de agua a una vivienda y los filtros para agua se diseñan para purificarla, existe una amplia variedad de diseños de filtros purificadores, que son dispositivos diseñados para filtrar las impurezas y los contaminantes del agua con el objetivo de proporcionar agua limpia y segura para uso y consumo humano. La variedad de filtros difiere en cuanto al material de filtrado (cerámicos, de membrana, de bioarena, etc.), así como los procesos para limpiar el agua, no existe

una solución única para todos los contextos, la tecnología de filtrado más apropiada corresponderá a los parámetros del agua a tratar. En México se requiere un mayor esfuerzo en el desarrollo e implementación de ecotecnologías para el aprovechamiento del agua a nivel doméstico tanto en zonas urbanas como rurales, además del SCALL y los filtros purificadores de agua, también se pueden implementar sanitarios secos y biofiltros para tener soluciones de manera más integral que permitan servicios de saneamiento e higiene apropiados al contexto de las personas. El SCALL (Figura 4) consiste en un sistema que permite interceptar, recolectar y almacenar el agua de lluvia, son una tecnología adaptable a zonas urbanas y rurales; hay opciones rústicas, sofisticadas, de alto costo, domiciliarias, comunitarias, etc.



Figura 4. Componentes de un SCALL. Fuente: Elaboración propia.

La captación o cosecha de agua de lluvia es una de las técnicas más antiguas para obtener agua de uso doméstico y/o riego. En México las condiciones geográficas y climáticas son favorables para la captación de agua de lluvia. A nivel nacional se tiene el Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Ecotecnias en Zonas Rurales (PROCAPTAR), que surge de la necesidad de dotar de agua a la población rural de México, en donde existen dificultades de índole técnica y económica para ser abastecidos mediante formas convencionales (ejemplo: sistemas de bombeo, redes de distribución, etc.), el programa permitirá abastecer de agua a la gente que hoy no cuenta con el servicio y que se tiene que trasladar grandes distancias para poder acceder al vital líquido. Dentro de los objetivos específicos del programa se encuentran: 1) Impulsar el desarrollo social,

el acceso al agua y saneamiento de las viviendas de zonas rurales de mayor marginación, mediante sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia y tecnologías de tratamiento de aguas residuales a nivel vivienda, 2) Involucrar a la sociedad de forma activa, y 3) Ayudar a abatir la pobreza multidimensional en el ámbito de los servicios básicos. La población objetivo de dicho programa es aquella localizada en las zonas rurales de México, que se encuentran bajo condiciones de alta y muy alta marginación, así también que presentan lluvias anuales acumuladas iguales o mayores a 1,500 mm (CONAGUA, 2017). El tratamiento del agua a nivel domiciliario se enfoca principalmente en la remoción de agentes patógenos, el problema más importante en términos de calidad del agua a nivel mundial. Aunque mejorar la calidad microbiológica es importante, también hay algunas tecnologías que remueven el hierro y el arsénico como beneficio secundario. Tanto el método convencional como el doméstico siguen el mismo proceso básico de tratamiento del agua, que son los tres pasos intermedios del enfoque de barreras múltiples: sedimentación, filtración y desinfección. En la figura 5 se presenta un filtro de Bioarena (FBA) implementado en varias partes del mundo para obtener agua limpia y segura, así como tres métodos prácticos y sencillos para desinfectar el agua (CAWST, 2012).

149

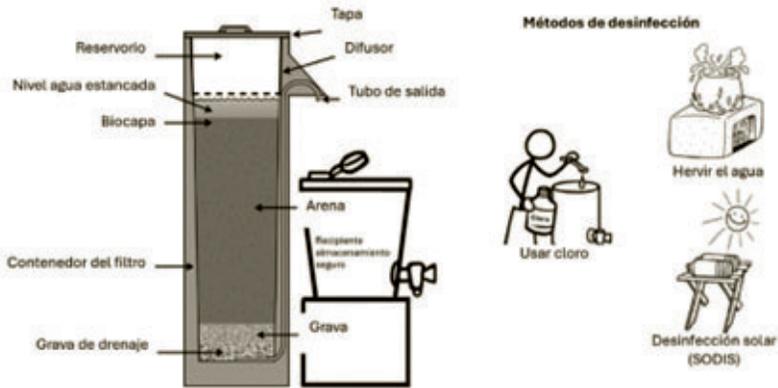


Figura 5. Partes de un Filtro de Bioarena (FBA) y métodos de desinfección (CAWST, 2012)

En México existen instituciones y asociaciones que han desarrollado proyectos en torno al aprovechamiento del agua así como su purificación, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), la Asociación Internacional de Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (IRCSA, por sus siglas en inglés), instancias gubernamentales como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA), Isla Urbana, el Instituto Politécnico Nacional (IPN) y la Agencia de Desarrollo Rural (ITAGRO). Respecto al tema de purificación son CIDECALLI-CP con el diseño y construcción de un sistema de captación, almacenamiento, purificación y envasado de agua de lluvia en la zona mazahua, la Fundación Cántaro Azul desarrolló la Mesita Azul, un sistema de desinfección de agua con luz ultravioleta y Grupo EOZ conformada por EOZ S.A. de C.V. y el Instituto de Tecnologías Rurales A.C, la primera se encarga del desarrollo, fabricación y venta de purificadores de agua y la segunda de la capacitación y la distribución de purificadores en comunidades rurales y peri-urbanas; en 2009 en el grupo EOZ desarrollaron un purificador: una llave con luz ultravioleta combinada con un filtro de fibras huecas, más compacto y fácil de transportar e instalar y que reduce la turbidez del agua antes de desinfectarla, viable en zonas rurales y urbanas (Moreno *et al.*, 2014; Nuñez, 2024). Sería bueno pensar en que se pueden diseñar, construir (con materiales locales) y evaluar filtros junto con los usuarios para proporcionarles algo apropiado, funcional y de bajo costo.

Bibliografía

- Burek, P.; Satoh, Y.; Fischer, G.; Kahil, M. T.; Scherzer, A.; Tramberend, S.; Nava, L. F.; Wada, Y.; Eisner, S.; Flörke, M.; Hanasaki, N.; Magnuszewski, P.; Cosgrove, B., y Wiberg, D. (2016). Water Futures and Solution: Fast Track Initiative (Final Report). IIASA Working Paper. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).
- Comité de Agua La Candelaria Tlapala, Comité de Agua Potable Guadalupe Victoria, Comité de Agua Potable San Sebastián, Zumpango, Estado de México (CAPSSZEM), Comité Pozo Rural San Lucas Amalinalco, Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de San Pablo Atlazalpan (SAPASPA), Sistema de Agua Potable Santa María Cuevas, Zumpango, Estado de México, Sistema de Agua Potable Santa María Ozumbilla A.C.

- (SIAPO), Unión de Comités Autónomos de Agua del Oriente del Estado de México (UCAOEM), Escuelita del agua, y ControlaTuGobierno, A.C. (2024). Guía integral para la administración de los Sistemas y Comités Autónomos de Agua (1era ed.). ControlaTuGobierno, A.C.
- CAWST. (2012, agosto). Biosand Filter Construction Manual | WASH Resources. <https://washresources.cawst.org/en/resources/b6be2637/biosand-filter-construction-manual>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2017). Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Ecotecnias en Zonas Rurales (PROCAPTAR). Consultado el 24 de agosto de 2024. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-para-captacion-de-agua-de-lluvia-y-ecotecnias-en-zonas-rurales-procaptar>
- Cuéntame INEGI (s.f.). Agua potable y drenaje. Consultado el 13 de septiembre de 2024.: <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx?tema=T>
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A. C. (sf). Contaminación en México. Consultado el 20 de agosto de 2024. <https://agua.org.mx/agua-contaminacion-en-mexico/>
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A. C. y GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit) (2017). Agua en México. Un prontuario para la correcta toma de decisiones. México. 47 p. Consultado el 26 de agosto de 2024. <https://agua.org.mx/biblioteca/agua-en-mexico-prontuario-la-correcta-toma-decisiones/>
- Gil Antonio, M. A., Reyes Hernández, H., Márquez Mireles, L. E., Cardona Benavides, A. (2014). Disponibilidad y uso eficiente de agua en zonas rurales. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Número 63: 67-73.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leit-zell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- López, R. (2017). México experimenta escasez de agua y falta de equidad en su distribución. Gaceta UNAM. Consultado el 30 de agosto en: <https://www.gaceta.unam.mx/mexico-experimenta-escasez-de-agua-y-falta-de-equidad-en-su-distribucion/>

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.

Núñez, G. C. B. (2024). *Evaluación de un filtro de bioarena para la obtención de agua para uso humano* [Tesis de Licenciatura, UNAM]. https://tesiunam.dgb.unam.mx/F?current_base=TESO1&func=direct&doc_number=000852155

ONU-Habitat (El Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos) (2021). *Comprender las dimensiones del problema del agua*. Consultado el 30 de agosto de 2024. <https://onu-habitat.org/index.php/comprender-las-dimensiones-del-problema-del-agua>

Ortiz-Moreno, J. A. O., Cerutti, O. R. M., y Gutiérrez, A. F. F. (2014). La ecotecnología en México. Imagia.

Ortiz-Moreno, J. A. O., Solís, V. S., y Zambrano, T. I. A. (2015). La ecotecnología en Michoacán.

Rivera, K. (2021). Cambio climático 2021: Sexto Informe del IPCC. Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. Consultado el 15 de septiembre de 2024. <https://agua.org.mx/actualidad/cambio-climatico-2021-sexto-informe-del-ipcc/>

Saavedra, C. y Heredia, C. L. (2014). Valoración de efectos e impactos de intervenciones de gestión, manejo y protección de áreas de recarga hídrica y de fuentes de agua en microcuencas: Experiencia de mancomunidades de municipios. HELVETAS Cooperación Suiza en Bolivia.

Sánchez, G. M., Ocampo, F. I., Villarreal, M. L. A., Méndez, E. J. A. y M. de L. Hernández-Rodríguez, M. de L. (2020). Gestión del agua para uso doméstico. Revista de El Colegio de San Luis. Nueva época. año X, número 21. El Colegio de San Luis. ISSN-E: 2007-8846. DOI: <http://dx.doi.org/10.21696/rcsl102120201102>

SEMARNAT y CONAGUA (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional del Agua) (2021). Estadísticas del Agua en México 2021. SEMARNAT. México.

APLICACIÓN DE TECNOLOGÍA SOSTENIBLE PARA MEJORAR LA CALIDAD DE AGUA TRATADA EN PTAR

**Sayra Orozco¹, Luis Bernardo López Sosa², Joel Vargas³,
Michel Rivero³**

¹ Posgrado de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Morelia, 58060, Michoacán, México.
sorozcocerros@gmail.com

² Universidad Intercultural Indígena de Michoacán Carr. Pátzcuaro-Erongaricuaro km 3 (Quinta Tzipecua), Huecorio, 61613, México

³ Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta Morelia, 58190, Michoacán, México.
mrivero@materiales.unam.mx

153

Resumen

En la actualidad, los seres vivos (no solamente las personas) enfrentamos un problema grave que representa un desafío global: escasez de agua potable. Las proyecciones en esta materia no son alentadoras. De acuerdo con la Sistema Nacional de Indicadores Ambientales (ILAC, 2021), se estima que en México menos del 60% de las aguas residuales municipales colectadas son tratadas adecuadamente. Ante este reto, implementar tecnologías sostenibles y asequibles en plantas de tratamiento de aguas residuales juega un papel importante. En este capítulo se describen de las diferentes tecnologías disponibles para el tratamiento de aguas residuales, sus principales características, con un énfasis particular en el uso de biomateriales para tal efecto. En este contexto, se presentan algunos resultados de obtenidos en proyectos actuales desarrollados entre la academia y comunidades de la Meseta Purépecha de Michoacán. Este capítulo explora cómo innovaciones en el área de ciencia de materiales pueden contribuir en la optimización de procesos remediación ambiental para garantizar el cumplimiento no solo de los estándares ambientales actuales, sino también que esto se logre con un enfoque de sostenibilidad en favor del bienestar comunitario.

Palabras clave: tecnología sostenible, biomateriales, calidad del agua, PTAR.

Introducción

Contexto general

Los contaminantes se refieren a agentes externos a un sistema y lo alteran o a los sistemas con los que interactúa. En el contexto ambiental, nos referimos por contaminantes a aquellas sustancias naturales o sintéticas que alteran la calidad del agua, aire o suelo al ser liberadas en estos sistemas, y que son perjudiciales para todos los ecosistemas. Dichos contaminantes pueden ser de origen doméstico (detergentes, cigarrillo, ...), industrial (metales pesados, aguas residuales, sustancias químicas tóxicas, ...), agrícola (fertilizantes, pesticidas, hormonas, ...), e incluso naturales (ceniza volcánica, metano o partículas de polvo, entre otros). Estos contaminantes pueden tener efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente, dependiendo de la concentración, tiempo de exposición, vías de contaminación, entre otros factores, por lo que es muy importante poder gestionarlos de manera adecuada. De entre los diferentes contaminantes, recientemente han ganado interés los contaminantes emergentes (CE). Los CE se refieren a un grupo de contaminantes que en la actualidad no se regulan adecuadamente y su presencia en el ambiente plantea riesgos potenciales. Este problema se agrava si se considera que el uso de los CE ha proliferado en los últimos años, por lo que se requiere de mayor atención y estudio para comprender sus efectos a largo plazo, al tiempo que se trabaja en tecnologías para su remoción.

En particular, se han encontrado diferentes CE en fuentes de agua (Aguilar y col., 2023), incluidos pesticidas, productos farmacéuticos, metales pesados, entre otros. Un aspecto que diferencia los CE de los contaminantes convencionales es suelen ser recalcitrantes. Es decir, los CE son sustancias persistentes en el medio ambiente durante un período prolongado sin descomponerse o degradarse fácilmente, y procesos convencionales para el tratamiento de agua (cómo procesos biológicos o químicos) no son efectivos debido a la naturaleza compleja de sus estructuras químicas. Un aspecto adicional es que, si bien en la actualidad la concentración en la que los podemos encontrar es baja respecto a otros contaminantes,

estas concentraciones han mostrado una tendencia al alza. Como resultado, los CE afectan los ecosistemas y pueden entrar en las cadenas alimenticias humana, y de otros seres vivos. Esto se puede observar en la Figura 1. Sin embargo, se desconocen con certeza los impactos a largo plazo de los CE puesto que no están completamente regulados, aunque hay cada vez más estudios al respecto. A continuación se describen de manera general algunos de los CE.

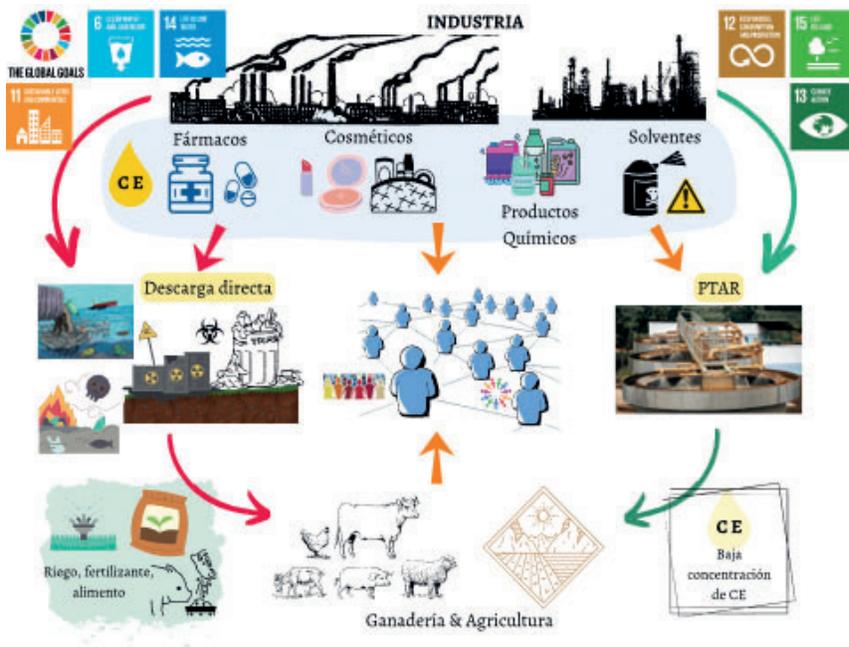


Figura 1. Ciclos de los contaminantes emergentes. Imagen tomada de (Orozco y col., 2024b).

Los plaguicidas, herbicidas, insecticidas y fungicidas son contaminantes que podemos asociar con las actividades agrícolas, ya que se utilizan para proteger los cultivos de diferentes tipos de plagas. Estos contaminantes, al igual que otros, pueden filtrarse a las aguas subterráneas o bien ser arrastrados hasta cuerpos de agua superficiales. Tanto las aguas superficiales, como los manantiales y ríos, como las subterráneas, como los pozos, son fuentes de consumo para las personas y otros seres vivos. Es importante mencionar que estos contaminantes son tóxicos aun cuando

se encuentren presentes en bajas concentraciones. La exposición a estos contaminantes afecta a especies a las que no están dirigidos (como a las personas) y perturban los ecosistemas acuáticos, así como a los ecosistemas que dependen de estos. Este tipo de contaminantes están asociados con problemas de crecimiento, disminución en la fertilidad, así como mayor susceptibilidad a diferentes enfermedades como cáncer, enfermedades neurológicas, respiratorias, endócrinas y del a piel.

Los productos farmacéuticos son otro grupo de CE que incluyen a los antibióticos, hormonas y analgésico. Este tipo de contaminantes llegan a las fuentes de agua a través de los desechos humanos y animales, y está asociada a una mala eliminación de los medicamentos ingeridos. Un aspecto que destacar para los humanos es que la contingencia por COVID incrementó el consumo de este tipo de productos, en particular los que son de venta libre. Entre los efectos que han asociado a este tipo de CE es el incremento en la resistencia a los antibióticos, pueden afectar la salud reproductiva, y alterar las funciones endócrinas de diferentes organismos.

156

Por otro lado, los metales pesados tienen como fuente principal las actividades industriales y mineras, en donde los residuos que los contienen son desechados sin el tratamiento adecuado. Dentro de los metales pesados podemos encontrar el plomo, mercurio, cadmio y cromo. Una diferencia significativa entre los metales pesados y los CE mencionados anteriormente (contaminantes orgánicos), es que los primeros no son biodegradables y se pueden bioacumular (acumulación de sustancias tóxicas de algún organismo vivo a lo largo del tiempo) y biomagnificar (la concentración de la sustancia tóxica se incrementa a medida que se asciende en la cadena alimenticia). La exposición a metales pesados plantea riesgos a la salud humana. Estos riesgos incluyen daños neurológicos, al sistema endócrino, fallos orgánicos y cáncer. La eliminación o remoción de estos contaminantes requiere de métodos innovadores ya que no se pueden eliminar por medios físicos o químicos como el resto de los CE.

La conservación de los ecosistemas y de la salud pública sólo se pueden garantizar si los CE se eliminan de las fuentes de agua. En este sentido, las plantas convencionales de tratamiento de aguas no están diseñadas para la eliminación de los CE, sino para el tratamiento de patógenos y otros contaminantes convencionales como nitratos y sólidos disueltos. Para el tratamiento de aguas residuales que contienen CE se están desarrollando e investigando diferentes tecnologías avanzadas que incluyen procesos de bioadsorción (Orozco y col., 2024a; Orozco y col., 2024), biorremediación

(usando plantas, baterías o algas), filtración por membranas, así como los procesos avanzados de oxidación (Orozco y col., 2022) que han mostrado diferentes grados de eficacia dependiendo de las condiciones experimentales.

Sin embargo, para hacer frente a los retos que enfrentamos como sociedad en materia de acceso a agua es necesario no solo contar con la tecnología necesaria para lograrlo, sino plantear soluciones que integran la normatividad vigente, así como actividades de sensibilización para la comunidad. Una cuestión adicional a tener en cuenta es que existe una gran variedad de CE que requieren un monitoreo constante, así como el desarrollo de métodos robustos para el tratamiento de agua, y que además deben cumplir con criterios de sostenibilidad. Esta es una tarea que se debe realizar de manera permanente ante la aparición de nuevos contaminantes y el aumento en la prevalencia y contaminación del medio ambiente. Para comunidades rurales, el tratamiento de aguas residuales tiene componentes adicionales de relevancia como lo es para la cultura y tradiciones (por ejemplo, la cultura Maya está vinculada a cuerpos de agua limpios como los cenotes), así como en la contribución para su autonomía y desarrollo sustentable. Esto últimos es particularmente en comunidades con autogobierno.

157

Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales

Las aguas residuales se refieren a aquellas aguas que han sido contaminadas por las actividades humanas, y por tanto necesitan de un tratamiento antes de ser reutilizadas o vertidas al medio ambiente. Las aguas residuales se pueden clasificar de diferentes maneras.

Por su origen:

- Domésticas: de actividades del hogar, como el uso de inodoros, baños, lavadora, trastes.
- Industriales: generadas en procesos industriales. Estas aguas pueden contener una gran cantidad de CE como metales pesados, productos químicos, entre otros.
- Agrícolas: se generan de actividades agrícolas. Éstas pueden contener pesticidas y fertilizantes.
- Pecuario: provienen de actividades de reproducción de animales (ganadería, acuicultura). Estas aguas pueden contener fármacos como antibióticos y hormonas.

Pluviales: resultan de la escorrentía de las lluvias, y por tanto contienen residuos de las presentes en las comunidades urbanas y rurales.

Por el grado de contaminación:

- No tratadas: contienen altos niveles de contaminantes y son un riesgo para los ecosistemas.
- Tratadas: son aquellas aguas que han sido sometidas a algún proceso de tratamiento lo que disminuye los niveles de contaminantes. El grado de remoción de dichos contaminantes determinará la factibilidad de su uso final.

Por su uso potencial:

- Reutilizables: Tras el tratamiento, este tipo de aguas puede ser utilizado para diferentes fines como riego, procesos industriales, u otras aplicaciones no potables.
- Que requieren tratamientos avanzados: son aquellas aguas que requieren de procesos adicionales para la remoción de contaminantes específicos antes de poder ser reutilizadas o vertidas de manera segura.
- El tratamiento de aguas residuales se realiza mediante diferentes procesos y que se llevan a cabo en varias etapas: tratamiento primario, secundario y terciario, en el que se emplean técnicas específicas para tratar contaminantes específicos. En la Figura 2 se esquematizan los flujos del agua residual dentro del ciclo del agua, y de donde se puede entender su relevancia.

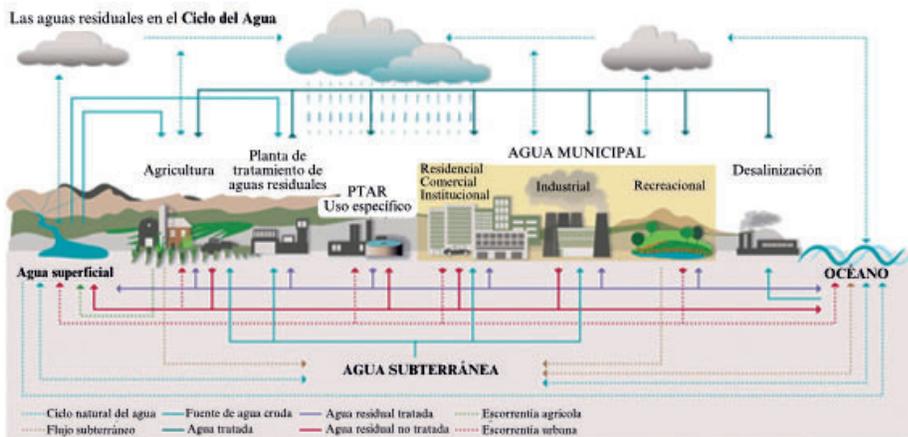


Figura 2. Diagrama de flujos del agua residual dentro del ciclo del agua. Imagen modificada de GRID-Arendal (Flickr). Licencia CC BY-NC-SA 2.0.

Tratamiento primario

159

El primero proceso al que se someten las aguas residuales implica la remoción de partículas grandes y sólidos. Estos procesos reducen la carga de materiales sólidos, lo que es necesario para la realización de procesos posteriores. En esta etapa se suelen empear procesos físicos como el cribado, sedimentación y desarenación. En el cribado, las aguas se hacen pasar por mallas o cribas que retienen residuos de gran tamaño como son plásticos, papel y otros residuos. En el proceso de sedimentación, las partículas más pesadas se precipitan para formar un lodo que se puede eliminar, lo mismo que materiales más ligeros como aceites que flotan en la superficie del agua residual.

Tratamiento secundario

Los tratamientos secundarios se centran en la materia orgánica disuelta, los nutrientes, así como en los microorganismos presentes en el efluente de los procesos primarios. Dentro de esta etapa se encuentra el proceso de lodos activados en donde los contaminantes orgánicos se descomponen por acción de microorganismos en un ambiente aeróbico. Para ello, se introduce oxígeno en el sistema para favorecer el crecimiento de bacte-

rias aerobias que convierten los contaminantes orgánicos en biomasa y dióxido de carbono. Otro proceso son los filtros percoladores que utilizan lechos (generalmente de polímeros o rocas) sobre los que fluyen las aguas residuales, permitiendo que los microorganismos consuman la materia orgánica. Existen otras tecnologías que mejoran la degradación de los contaminantes mediante el control más preciso del sistema. Tal es el caso de los biorreactores de membrana y los reactores discontinuos secuenciados.

Tratamiento terciario

160

En los tratamientos terciarios se eliminan contaminantes específicos como el nitrógeno, fósforo, metales pesados y CE. Dentro de las técnicas de tratamiento terciario se encuentra los procesos fisicoquímicos (coagulación / floculación), en donde los contaminantes se acomplejan (forman moléculas más grandes) mediante la adición de sustancias químicas específicas para el contaminante a remover, lo que permite removerlos más fácilmente. Otra técnica es la bioadsorción en la que los contaminantes (generalmente productos farmacéuticos, metales pesados o pesticidas) son adsorbidos en la superficie porosa del biomaterial, que se puede remover más fácilmente. Por las propiedades del carbón activado en cuanto a su área superficial, este material es comúnmente utilizado. Sin embargo, se han probado otros biomateriales naturales con ventajas interesantes (Javed y col., 2024). Un aspecto importante de esta técnica es que los contaminantes solamente cambian de medio, por lo que los biomateriales con los contaminantes adsorbidos necesitan ser postprocesados de manera adecuada. Una tecnología similar es la filtración por membrana en la que partículas finas, microorganismos y algunos iones (como metales pesados) son removidos del agua residual mediante técnicas como la microfiltración y la ósmosis inversa (Fakhri y col., 2024a). Finalmente, se tienen los procesos avanzados de oxidación (PAO) en los que los contaminantes recalcitrantes se degradan mediante diferentes agentes oxidantes como el ozono o la luz (como la fotocatalisis).

Tratamiento y eliminación de lodos

Dentro de las etapas mencionadas anteriormente se acumulan lodos como subproducto de diversos procesos. Para tal efecto se pueden imple-

mentar métodos como la digestión anaerobia, compostaje o el secado. En el primer caso, se descompone la materia orgánica presente en los lodos produciendo biogás. Este biogás se puede utilizar como fuente de energía para otros procesos. Por su parte, el compostaje y secado permiten reducir el volumen de los lodos y habilitan la posibilidad de utilizarlos como fertilizantes, o bien hacer una disposición final con un impacto ambiental menor.

Tecnologías emergentes

Una mención particular merecen algunas tecnologías que se han investigado en los últimos años para atender el creciente problema de acceso a agua. Una de estas tecnologías es la electrocoagulación en la que los contaminantes presentes en las aguas residuales se desestabilizan mediante la inyección de corrientes eléctricas. Esta técnica ha mostrado eficacia en el tratamiento de metales pesados y sólidos en suspensión. En la biorremediación se hacen uso de algas, hongos o bacterias biodiseñadas específicamente para la remoción de ciertos contaminantes como metales pesados o fármacos. Finalmente, se tienen los humedales artificiales que buscan imitar a los humedales que, mediante el uso de ciertas especies de plantas, suelos y bacterias, permiten tratar efectivamente diversas aguas residuales. Es importante resaltar que muchos de estos campos e investigación se han visto ampliamente beneficiados por el desarrollo de la nanotecnología, que ha permitido mejorar la eficacia de diversas técnicas en la remoción de contaminantes.

Como se puede observar, cada tecnología permite atender contaminantes específicos presentes en el agua residual con el fin de garantizar que el agua tratada cumpla con las normas vigentes para su reutilización o vertido en otras fuentes (ver Figura 2). Por lo tanto, la eficacia de las PTAR radica en la integración de las tecnologías adecuadas a las características del agua residual, que sean tecnologías eficientes y en la medida de lo posible que sean sostenibles.

Biomateriales: definición y caracterización

Existen diferentes concepciones sobre la definición de biomateriales. En este trabajo nos referimos a los biomateriales a aquellos materiales que se han sintetizado a partir de fuentes biológicas. Entonces, en el contexto

de este trabajo, los biomateriales se desarrollaron para la remediación del agua mediante la remoción de los contaminantes. Por su naturaleza, capacidad de biodegradarse de forma natural, estos materiales representan una opción sostenible en el tratamiento del agua. Entre los biomateriales más empleados para la remoción de contaminantes del agua se encuentran los biopolímeros (incluidos el quitosano, la celulosa y el alginato), el *biochar*, carbones activados, biomateriales naturales, arcillas naturales o biocompuestos modificados.

162

Los biomateriales pueden clasificarse de diferentes maneras, por ejemplo, con base en su origen, estructura y funcionalidad. Los biopolímeros naturales proceden de organismos biológicos. Dos ejemplos son el quitosano y el alginato que se obtienen de los crustáceos y las algas, respectivamente. La afinidad que estos materiales tienen con ciertos contaminantes, así como la posibilidad de modificarlos químicamente, han permitido mejorar su capacidad de adsorción y por lo tanto son empleados comúnmente en remediación de agua. Por otro lado, se tienen los biocarbones (como el *biochar* o el carbón activado) son materiales sintetizados a partir de la pirólisis de materia orgánica en condiciones de oxígeno limitado. Aunque se pueden utilizar diferentes fuentes biomásicas, en los últimos años se han incrementado el uso de residuos agroindustriales buscando mitigar dos problemas: la contaminación del agua y el manejo de residuos (Orozco y col., 2024a; Orozco y col., 2024). Una característica de estos materiales es su elevada porosidad y área superficial que mejoran su capacidad para adsorber diversos CE. De igual manera, existen algunos compuestos que combinan materiales naturales y sintéticos buscando optimizar las propiedades fisicoquímicas del material resultante, incluidas la adsorción. Finalmente, se pueden mencionar a los microorganismos (incluidos bacterias o algas) que son capaces de degradar contaminantes orgánicos.

Biomateriales en remediación de agua

La capacidad de adsorción y biorremediación de los biomateriales, así como su bajo impacto ambiental, los hacen opciones viables para el tratamiento de aguas residuales. Por un lado, los biomateriales pueden remover contaminantes mediante el proceso de adsorción. En este proceso, los contaminantes (adsorbato) se adsorben en la superficie del biomaterial (adsorbente). Este proceso se ejemplifica en la Figura 3, en donde se

consideran diversos contaminantes. En esta imagen es claro que el área superficial (sitios activos), el tamaño de los poros y el tamaño de las moléculas a adsorber tienen un papel relevante en el proceso de adsorción. De igual manera, es importante la afinidad que los biomateriales tengan con los contaminantes. Por ejemplo, el quitosano tiene una afinidad natural con iones metálicos (Gonçalves y col., 2024), por lo que se ha evaluado para tales efectos. Por su parte, el alginato y la celulosa se han utilizado comúnmente para la remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos. En cualquier caso, es importante mencionar que los biomateriales se pueden funcionalizar para mejorar sus propiedades fisicoquímicas.

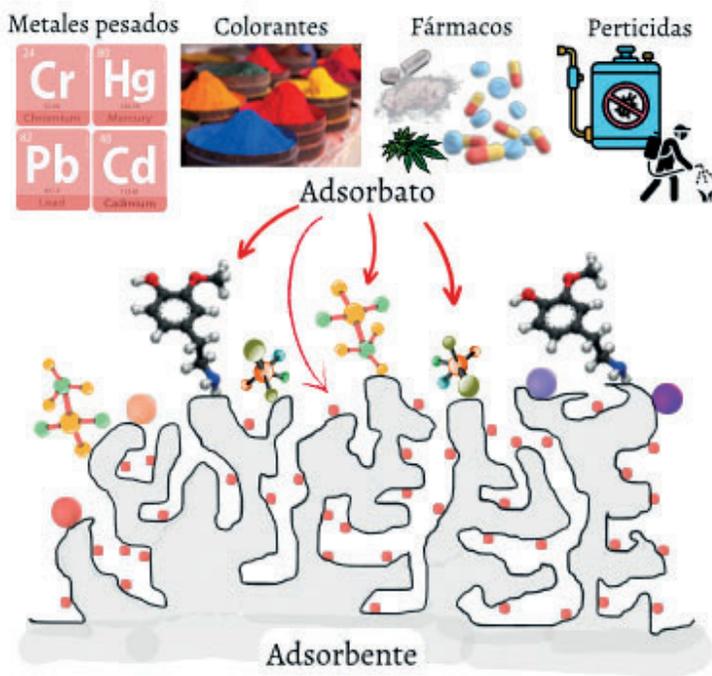
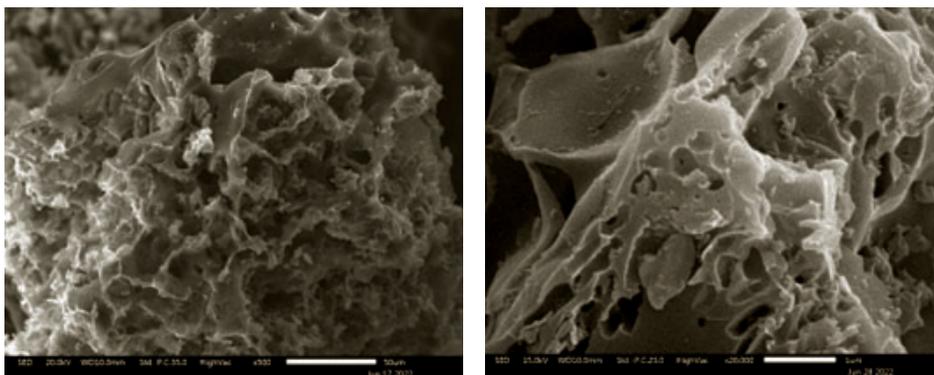


Figura 3. Proceso de bioadsorción. Imagen adaptada de (Orozco y col., 2024a).

Tal es el caso del carbón activado, que, por su elevada porosidad y contenido de carbono, es una opción ampliamente utilizada en la remediación de agua con presencia de diferentes contaminantes orgánicos e inorgánicos. En la Figura 4 se muestran imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) de carbones activados sintetizados de residuos de piel y semilla de aguacate. De la imagen para la piel se puede observar la elevada área superficial del material y en tanto que los poros de 100 a 500 nm en la imagen de la semilla.



164

Figura 4. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de carbones activados sintetizados de residuos de piel (izquierda) y semilla (derecha) de aguacate. Imagen tomada de (Orozco y col., 2025).

Por su parte, en la biorremediación se utilizan microorganismos (cepas específicas de bacterias, algas y hongos) capaces de metabolizar y descomponer los contaminantes, para convertirlos en sustancias menos peligrosas o inertes. Por ejemplo, algunas bacterias, cianobacterias, hongos y algas se han empleado para la degradación de hidrocarburos (Chahouri y col., 2024). Sin embargo, estos organismos tienen una limitada capacidad de metabolizar ciertos hidrocarburos, por lo que es necesario crear conjuntos de poblaciones para degradar mezclas complejas de hidrocarburos. De igual manera, se pueden utilizar microorganismos para biotransformar los metales pesados a través de procesos de oxidación, reducción, quelación y metilación (Ding y col., 2024). En este contexto, los microorganismos son mediadores críticos para cambiar la especiación de los metales pesados en el ambiente, lo que está ligado a un cambio en su toxicidad. Al igual que con los bioadsorbentes, la biorremediación es un proceso

sostenible y autorregulable, aunque es necesario definir correctamente las condiciones bajo las que se llevarán a cabo los procesos. Finalmente, es importante mencionar que se están desarrollando sistemas híbridos que buscan optimizar y eficientar la remoción de contaminantes de los flujos de agua (Alardhi y col., 2024). Con este enfoque se busca mejorar las capacidades de los sistemas al fusionar las ventajas que los componentes individuales ofrecen de manera independiente.

Ventajas y desventajas de biomateriales aplicados en el tratamiento de agua

Usar biomateriales en la remediación de agua ofrece diferentes ventajas que se discutirán a continuación, en particular en términos de su biocompatibilidad y sostenibilidad.

- *Biodegradabilidad*: a diferencia de muchos materiales sintéticos, los biomateriales suelen descomponerse naturalmente sin dejar residuos peligrosos, salvo los contaminantes que pudieran contener después de su uso. Este aspecto es importante, ya que se disminuye el riesgo de contaminación secundaria del agua.
- *Sostenibilidad*: una gran mayoría de los biomateriales (como el quitosano, carbones activados, entre otros) provienen de fuentes renovables o bien de residuos agrícolas, lo que los convierte en una opción sostenible viable en el tratamiento de agua (Osman y col., 2024).
- *Selectividad y versatilidad*: los biomateriales son capaces de remover contaminantes específicos, lo que permite utilizarlos para tratar contaminación de agua con características específicas de cada localidad.
- *Rentabilidad*: ya que algunos de los biomateriales se pueden sintetizar a partir de residuos, se pueden atender dos problemas de manera simultánea: i) tratamiento de agua residual y ii) manejo de residuos. En ambos casos, se obtienen beneficios ambientales y económicos. Adicionalmente, algunas comunidades microbiales pueden ser autosostenibles, por lo que se evita su reposición constante.
- *Reducción en el uso de productos químicos*: derivado de los procesos de síntesis de los biomateriales, su uso, y las condiciones en las que suelen operar (generalmente a presión y temperatura ambiente).

Con estas características, es claro que la huella ambiental del tratamiento de aguas residuales es menor cuando se utilizan biomateriales al tiempo que se buscan incorporar los principios de la tecnología verde. La *tecnología verde* se refiere a un tipo de tecnología que se considera respetuosa con el medio ambiente. Sin embargo, usar biomateriales para remediación ambiental también plantea algunos retos.

- *Susceptibilidad a las condiciones ambientales*: ya que factores como el pH o la temperatura pueden afectar significativamente la eficacia en el proceso de tratamiento, así como su estabilidad. Por ejemplo, un cambio en el pH puede conducir a la degradación de los biomateriales, a que se aglutinen, o a reducir la atracción electrostática del contaminante al biomaterial (al considerar el punto isoeléctrico del biomaterial), y por ende reduce su efectividad en la remoción de contaminantes. Por su parte, los tratamientos que utilizan microorganismos también son sensibles a las variables externas, ya que estos pueden tener dificultades para sobrevivir o rendir óptimamente fuera de sus rangos de operación.
- *Especificidad*: aunque la selectividad de los biomateriales puede ser una ventaja para el diseño de sistemas *ad-hoc*, también limita su aplicabilidad, en particular en escenarios en donde se tiene un *coctel* de contaminantes.
- *Saturación*: algunos biomateriales como los carbones activados pueden saturarse rápidamente, lo que implica que éstos deben ser regenerados o sustituidos de manera más frecuente. El costo económico-ambiental dependerá del tipo de biomaterial y contaminantes tratados.
- *Posprocesamiento*: Para biomateriales basados en adsorción, será necesario realizar un proceso adicional para gestionar integralmente los residuos ya que el biomaterial tendrá soportado a los contaminantes. Esto se observa gráficamente en la Figura 5, en la que se muestra un biomaterial natural sintetizado a partir de residuos de aguacate antes y después del proceso de bioadsorción de un colorante modelo (rodamina B). En cualquier caso es mucho más fácil y conveniente manejar los contaminantes en la matriz sólida (biomaterial gastado) que en el agua.



Figura 5. Biomaterial derivado de residuos de mango virgen (izquierda) y gastado (derecha). El color rojizo se debe a que el biomaterial natural tiene adsorbido el colorante Rodamina B.

- *Escalabilidad*: el reto principal es poder escalar los procesos para su uso industrial y el tratamiento a gran escala. En particular, para algunos biomateriales que podrían requerir infraestructura especializada o los gastos operativos requeridos para ello.

167

Como se puede ver, los diferentes biomateriales representan una alternativa viable técnica, económica y ambientalmente. Sin embargo, existen diversos retos que limitan su aplicación u que son fuente de investigaciones a nivel nacional e internacional para lograr una completa integración de estas tecnologías verdes en los procesos actuales de remediación ambiental.

Propiedades de los materiales sintetizados

Como hemos visto, existen diferentes tipos de biomateriales que han sido empleados para la remediación de agua. En lo que resta de este capítulo, nos enfocaremos en los biomateriales basados en el proceso de adsorción. En estos biomateriales, las propiedades fisicoquímicas determinan su eficacia y aplicabilidad en la remoción de diferentes contaminantes. A continuación, se describen dichas propiedades.

- *Superficie y porosidad.* Puesto que el proceso de adsorción depende de que los contaminantes se “fijen” en la superficie, entre mayor sea el área superficial, mayor serán los sitios activos en donde se pueden adsorber los contaminantes. De igual manera, el tamaño de los poros y su distribución en el bioadsorbente, en conjunto con el tamaño de las moléculas de los contaminantes, determinarán el número de moléculas que podrá atrapar un biomaterial. Una característica adicional que permitirá incrementar la eficiencia en el proceso de adsorción (al incrementar el área superficial) es que los poros estén interconectados.
- *Grupos funcionales:* en química, los grupos funcionales corresponden a un grupo de átomos que se encuentran en una molécula y que le proporciona característica muy específica a un compuesto químico. Estos grupos son los responsables de la reactividad, así como de las propiedades físicas de las sustancias. Los grupos funcionales como el radical hidroxilo (-OH), el grupo amino (-NH₂) y el carboxilo (-COOH), juegan un rol importante en el proceso de fijación de los contaminantes en los biomateriales mediante reacciones químicas. Un ejemplo es el quitosano, que al contener grupos amino, atrae iones metálicos, y por lo tanto es eficaz en la remoción de metales pesados presentes en agua. Los grupos funcionales permiten la funcionalización de dichos materiales, permitiendo mejorar la especificidad y fuerza de unión haciéndolos más eficaces para un contaminante deseado.
- *Hidrofilicidad o hidrofobicidad:* La afinidad al agua de los biomateriales define la manera en la éstos interactúan con los contaminantes. De este modo, los materiales hidrofílicos son idóneos para adsorber contaminantes orgánicos polares como los metales pesados, que se disuelven fácilmente en el agua. Por el contrario, los materiales hidrofóbicos son más adecuados para adsorber contaminantes no polares como el petróleo o algunos pesticidas. Mediante este parámetro es posible diseñar biomateriales selectivos en función de su naturaleza química.
- *Capacidad de intercambio iónico:* Se refiere a la habilidad de intercambiar iones con el medio circundante. Este proceso es fundamental en diferentes contextos ya que determina la interacción de un material con el medio que lo rodea. En la remediación del agua residuales, esto es particularmente importante ya que esto definirá

la capacidad de eliminar los contaminantes que en muchas ocasiones se encuentran disueltos en agua. Esta capacidad se puede mejorar mediante la modificación del material con algunos grupos funcionales adicionales.

- *Estabilidad mecánica y durabilidad*: el escalamiento y aplicaciones de los sistemas de bioadsorción no podría concebirse sin materiales que conserven su integridad estructural (que no se degraden o desintegren) y su rendimiento (que no se modifiquen sus propiedades fisicoquímicas) a lo largo del tiempo.
- *pH y Estabilidad química*: los biomateriales necesitan soportar un rango de condiciones de pH amplio para garantizar su funcionamiento efectivo para diversos tipos de agua, que van desde lo alcalino hasta lo ácido. Es decir, que un material conserve su eficacia en la remoción de contaminantes, aún bajo condiciones en las que la química del agua varía. La presencia de diferentes contaminantes orgánicos puede alterar el pH del agua.
- *Biodegradabilidad*: en el área del tratamiento del agua, la biodegradabilidad es un aspecto que se considera posterior a su aplicación en la remediación ambiental. En este sentido, la biodegradabilidad minimiza el impacto ambiental de los materiales gastados o que han llegado al fin de su vida útil. Los biomateriales como el quitosano o la celulosa se descomponen de manera natural sin dejar residuos peligrosos (excepto los contaminantes que pudieran soportar), contribuyendo en la reducción de la contaminación asociada con la disposición final.

169

Estas propiedades fisicoquímicas de los biomateriales los hacen herramientas versátiles muy útiles en la remediación ambiental del agua, ya que se pueden ajustar para mejorar su habilidad de unirse o adsorber una amplia gama de contaminantes desde un enfoque sostenible.

Síntesis de biomateriales

En esta sección se discute de manera general los pasos para sintetizar los biomateriales, cuáles son los CE y los mecanismos para su remoción, así como el uso de biomateriales para el tratamiento de aguas residuales. Para este último punto, nos basaremos en la experiencia que se tienen en el tratamiento del agua residual de la planta de tratamiento localizada en la comunidad de San Francisco Pichátaro, Michoacán.

Metodología

La síntesis de biomateriales implica algunos pasos generales que se describen a continuación: i) selección de la materia prima, ii) preparación del biomaterial, iii) su funcionalización (en caso de ser necesario y se puede incorporar en el proceso anterior), iv) caracterización (que nos permite cuantificar las propiedades de los materiales), y v) escalamiento y búsqueda de aplicaciones. Aunque el proceso se puede modificar con base en las características requeridas del biomaterial y del contaminante objetivo, la metodología es general para todos ellos.

1. Selección y preparación de la materia prima: EL primer paso corresponde a la selección de la materia prima que se utilizará para sintetizar los biomateriales. Si se conocen las propiedades de diferentes biomateriales y su afinidad con ciertos contaminantes, esto también se debe considerar en la selección. Las fuentes más comunes son de origen vegetal o animal. En este contexto, es muy común centrarse en residuos de estos materiales, y en particular de aquellos de la región de interés. Para el estado de Michoacán, dos de los residuos orgánicos más importantes corresponden al aguacate y el mango, aunque se pueden identificar otros en diferentes regiones del estado. Puesto que los residuos contienen algunas impurezas, estos se suelen pretratar (lavar con diferentes agentes) para mejorar su pureza y aumentar su rendimiento. Estos materiales son cortados en trozos más pequeños para facilitar el proceso de secado, y posteriormente pesados (antes y después de los procesos para determinar cambios en su masa). Los materiales se someten a un proceso de secado en un horno a temperaturas bajas para evitar daños en la estructura de los materiales. Las temperaturas se determinan de procesos de caracterización como análisis termogravimétrico. Posterior al secado, los materiales se someten a un proceso de trituración o molienda, del que se obtienen los bioadsorbentes naturales. Tener partículas más pequeñas facilitará procesos posteriores como la pirólisis para obtener carbón activado. Este proceso se muestra en la Figura 6, que se puede aplicar a los del mango y del aguacate. Al final del proceso se puede observar en la imagen de SEM que el material tiene la forma de pequeñas esferas con dimensiones aproximadas de 15 μm . Un aspecto importante de este pro-

ceso es que por las temperaturas que se manejan, es posible poder utilizar energía solar para el proceso de secado.



171

Figura 6. Selección y preparación de la materia prima.

2. *Síntesis y formación*: En esta etapa, los biomateriales naturales obtenidos se someten a otros procesos para estructurarlos. Para la obtención del carbón activado, este proceso implica la pirólisis. Éste consiste en someter el biomaterial a un proceso de calentamiento a temperaturas elevadas (generalmente superiores a 600°C) en ausencia de oxígeno. El resultado será una estructura porosa rica en carbono. Según se necesite, es posible moldear la materia prima para crear películas, fibras u otras formas deseadas.
3. *Funcionalización*: Este proceso consiste en modificar las propiedades fisicoquímicas de los biomateriales para aumentar su afinidad a contaminantes específicos o bien para modificar su estructura. Como se comentó, este proceso podría realizarse durante la etapa

anterior, o bien, puede consistir de un proceso posterior. La funcionalización puede lograrse mediante tratamientos térmicos o químicos, lo que permite recubrir el biomaterial con nanopartículas de interés o bien aumentar el área superficial, que incrementa el número de sitios disponibles para realizar el proceso de adsorción. En la Figura 7 se muestran los procesos de activación y síntesis de los biomateriales. El resultado se puede ver en las imágenes SEM de los carbones activados en los que se incrementa el área superficial (ver Figura 6).



Figura 7. Funcionalización (activación) y síntesis de carbón activado.

4. *Caracterización*: Los materiales obtenidos se debe caracterizar para confirmar sus propiedades estructurales, químicas y físicas. Para ellos se pueden emplear diferentes técnicas como las enumeradas a continuación:

- *Microscopía por barrido electrónico (SEM)*: permite observar la morfología de los materiales a un detalle que no sería posible con microscopios ópticos.
- *Espectroscopía de rayos X por energía dispersiva (EDS)*: permite determinar la composición elemental de la muestra. Es decir, nos permite identificar los elementos presentes en la superficie del material.
- *Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)*: permite identificar la presencia de grupos funcionales en el material, lo que ayuda a comprender sus propiedades química y de interacción con otros compuestos.
- *Área BET (Brunauer-Emmett-Teller)*: permite determinar el área superficial de un material poroso, el tamaño medio de poro, así como su distribución. Esta información es relevantes para los procesos de adsorción.
- *Análisis termogravimétrico (TGA)*: permite evaluar la estabilidad térmica del material. Para ello se evalúa la pérdida de masa como función de la temperatura de la muestra. Con esto se pueden identificar las temperaturas de transición de fase.
- *Difracción de rayos X (XRD)*: permite identificar las fases cristalinas del material, que permite comprender algunas de sus propiedades mecánicas. Los biomateriales y carbones activados presentan comúnmente obtener estructuras amorfas o bien estructuras con un grado de cristalinidad muy bajo.
- *Espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS)*: permite determinar la composición superficial de los biomateriales. Es decir, esta técnica nos permite identificar las especies químicas y su valencia presentes en la muestra.

173

Es importante mencionar que las técnicas descritas brevemente son las más comunes durante la caracterización de biomateriales. Estas técnicas son complementarias entre sí. Es decir, no se puede obtener la información de una técnica con otra. Existen otras técnicas como la Espectrometría de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP) o la resonancia magnética

nucleare (RMN) que proporcionan información adicional. Las técnicas de medición dependerán de la infraestructura disponible y del fin último de la investigación.

5. *Evaluación y optimización:* Cuando el material ha sido caracterizado, es necesario evaluar su efectividad en la remoción de contaminantes. Para ello se realizan pruebas en el laboratorio. De manera general, estas pruebas implican la preparación de soluciones contaminantes modelo, en las que se conoce la concentración del contaminante o de la mezcla de contaminantes (cualquier que estos sean). La concentración inicial de los contaminantes se suele determinar con base en valores reportados en la literatura. En otras ocasiones, se utilizan aguas reales (Orozco y col., 2025). Estas soluciones se someten a un proceso de bioadsorción (ver Figura 8), para el que generalmente se emplean dos metodologías. En la primera, el experimento se realiza en un reactor. En este caso, la solución contaminante modelo se pone en contacto con el bioadsorbente que se mantiene en suspensión mediante agitación continua. En la segunda opción, la solución contaminante se hace pasar por una columna de adsorción en la que el bioadsorbente se encuentra soportado en la base de la columna. El flujo puede ser por gravedad, o bien producido de forma continua mediante un sistema de bombeo.

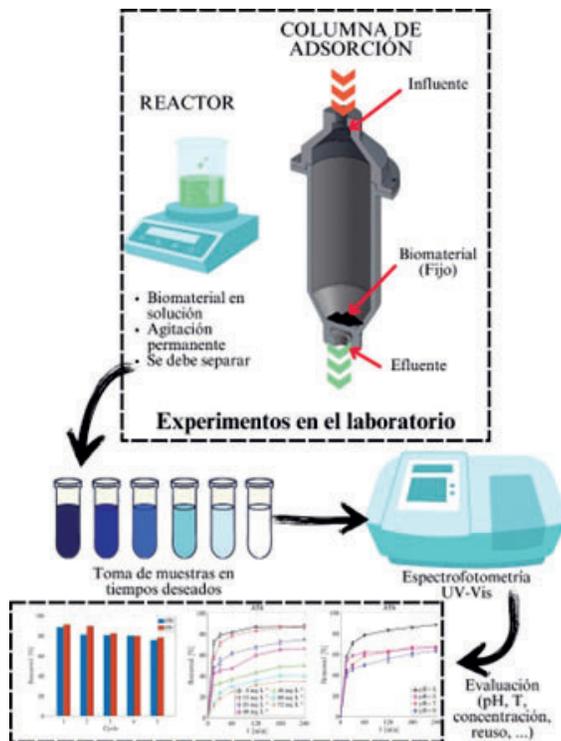


Figura 8. Esquema del proceso experimental en el laboratorio.

Desde el punto de vista práctico, es más viable la implementación de columnas de adsorción en sistemas reales ya se evita el consumo constante de energía (salvo el requerido por el sistema de bombeo) y también el proceso de separación del biomaterial del agua. Para evaluar el proceso de bioadsorción es necesario tomar muestras en periodos establecidos previamente. Cada una de estas muestras se caracteriza mediante espectroscopía UV-Vis que permite identificar diferencias compuestas. Esta técnica se basa en la interacción del contaminante con la luz, por lo que se puede determinar la concentración del contaminante. Al ser una técnica basada en la luz, es importante que las muestras analizadas estén libres del biomaterial, ya que podrían afectar las mediciones. Es importante mencionar que se podrían emplear otras técnicas para cuantificar la remoción del contaminante, como resonancia magnética nuclear o cromatografía de líquidos, aunque su costo es considerablemente superior. Con base en

las mediciones, se pueden hacer las curvas de absorción como función del tiempo. Como se puede observar en la Figura 8, el proceso de adsorción suele llevarse a cabo en los primeros minutos del experimento debido a la gran disponibilidad de sitios activos para la adsorción. Se deben realizar una serie de experimentos en los que se varían las condiciones (pH, temperatura, concentración del biomaterial, concentración del contaminante, ...) para determinar el rendimiento en la remoción del contaminante y que se pueda garantizar el correcto desempeño del biomaterial bajo condiciones de operación reales. Finalmente, se deben someter el biomaterial a múltiples ciclos para evaluar su estabilidad y funcionamiento. En función de los resultados obtenidos del análisis multiparamétrico, es posible encontrar el punto óptimo de operación del biomaterial. De igual manera, los resultados se pueden utilizar para diseñar nuevas metodologías de síntesis para mejorar las características del biomaterial en cuanto a adsorción, selectividad, estabilidad y reutilización.

176

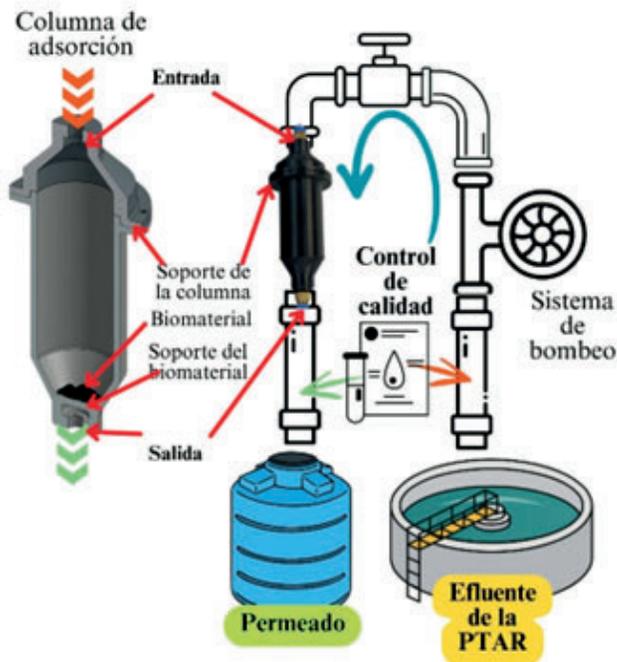


Figura 9. Esquema de la metodología experimental para el tratamiento del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales ubicado en San Francisco, Pichátaro. Imagen modificada de (Orozco y col., 2025).

En una etapa posterior a las pruebas con aguas sintéticas⁷, es necesario realizar experimentos controlados con aguas reales (ver Figura 9). En este caso, la presencia de un mayor número de contaminantes modificará el rendimiento del biomaterial, ya que existirá una competencia entre los contaminantes (que tienen propiedades fisicoquímicas muy distintas). En la Figura 9 se presenta un esquema experimental para tratar el efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) localizada en la comunidad de San Francisco Pichátaro.

6. *Escalado y diseño de aplicaciones*: Si los resultados obtenidos en los análisis anteriores fueron satisfactorios, entonces el siguiente paso será probar los biomateriales en una planta piloto. En el laboratorio, los experimentos suelen realizarse con un volumen de fluido menor a 500 mL, y las dimensiones del reactor / columna de adsorción de algunos centímetros. En la planta piloto, tanto los volúmenes de trabajo y las dimensiones son al menos un orden de magnitud mayor. El análisis de la planta piloto permitirá dos cosas: i) determinar la viabilidad técnica en el uso de los biomateriales, y ii) tener conocimiento de los requisitos reales para su aplicación en sistemas reales y que faciliten su integración.

177

La metodología descrita anteriormente es la que se implementa de manera cotidiana en las instituciones para desarrollar y caracterizar biomateriales, para modificarlos y para evaluar su efectividad en la remoción de diferentes contaminantes.

Principales contaminantes emergentes y mecanismos de remoción

Hasta el momento hemos tratado de manera general con las características generales de los biomateriales, así como con los métodos de síntesis, caracterización y evaluación. A continuación, mostramos en la Tabla 1 un resumen con los contaminantes emergentes, el mecanismo de remediación ambiental empleado, así como su eficiencia. Con esto se espera que

⁷ Por agua sintética nos referimos a las soluciones de contaminantes que se obtuvieron en el laboratorio y que por lo general corresponden a un solo contaminante o mezcla controlada de contaminantes. En aguas reales, además del contaminante que se quiere estudiar, se tiene presencia de detergentes, sólidos volátiles, entre otros.

el lector tenga un panorama más general respecto al uso de biomateriales en la remoción de CE presentes en agua, pero no representa una revisión exhaustiva de la literatura, y los valores reportados se obtuvieron bajo condiciones controladas en el laboratorio.

Tabla 1. Resumen contaminantes emergentes, el mecanismo de remediación ambiental empleado, así como su eficiencia

CE	Mecanismo de remediación	Eficiencia	Refs.
Metales pesados (plomo, cadmio, mercurio)	Adsorción con polímeros; intercambio iónico, y complejación.	90-98% para algunos metales, dependiendo de las condiciones iniciales.	(Hussain y col., 2024; Jaffar y col., 2024; Jiménez y col., 2024; Khanzada y col., 2024; Zheng y col., 2024)
Productos farmacéuticos (antibióticos, analgésicos, entre otros)	Adsorción con biochar / carbón activado; degradación mediante biorremediación.	70-95% con biomateriales de carbón. 80-99% degradación (dependiendo del contaminante).	(Aminul y col., 2024; Guetta y col., 2024; Lukášová y col., 2022; Rashid y col., 2024)
Pesticidas (gryfosfato, atrazina, entre otros)	Adsorción y biorremediación.	60-85% para bioadsorción. Hasta 90% para algunos microorganismos.	(Asghar y col., 2024; Ighalo y col., 2021; Ramos y col., 2022)
Colorantes (colorantes azoicos, entre otros.)	Bioadsorción. Biorremediación enzimática con hongos.	80-98% por bioadsorción. Hasta 90% mediante degradación fúngica.	(Al-Gethami y col., 2024; Kausar y col., 2023; Mahajan y col., 2023; Şenol y col., 2024; Sirajudheen y col., 2021)
Microplásticos	Filtración y captura con biocompositos modificados.	70-85%, dependiendo del tamaño y porosidad del material.	(Albaseer y col., 2024; Fakhri y col., 2024b; Mehmood y col., 2023; Mousazadehgavan y col., 2024)

Nitratos y fosfatos (causantes de eutrofización)	Adsorción y complejación con biomateriales a base de carbón. Intercambio iónico.	60-90% para nitratos. Hasta 95% para fosfatos.	(Priya y col., 2022)
PFAS*	Bioadsorción y degradación con bacterias especializadas.	60-80% mediante bioadsorción. 70-90% mediante degradación microbial.	(Calore y col., 2024; Ezeorba y col., 2024; Karimi-Maleh y col., 2023; Lei y col., 2023; Venkatesh y col., 2024)

* Sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas. Algunas de estas sustancias son sumamente persistentes en el medio ambiente y en el organismo humano.

Es importante resaltar que los rangos reportados están influidos por factores como la concentración inicial del contaminante, el pH, la temperatura, así como por el tiempo de contacto, por lo que pueden variar. Sin embargo, esta información nos muestra los alcances de estas tecnologías para atender problemas prioritarios a nivel internacional, nacional, regional y local.

179

Uso de biomateriales en PTAR

Descripción de la PTAR

Una planta de tratamiento de aguas residuales es una instalación diseñada para tratar aguas residuales antes de su reuso o reintegración al medio ambiente. El objetivo principal de las PTAR es eliminar los contaminantes, materia orgánica, agentes patógenos y sustancias químicas nocivas presentes en aguas residuales a fin de proteger la integridad de los ecosistemas y la salud pública. Por tanto, las PATR ayudan a mitigar los efectos de la contaminación del agua y contribuyen en la gestión sostenible de la misma. De manera general, las PTAR constan de varias etapas que se describen a continuación. La existencia o no de estas etapas está definida por las características de las aguas a tratar (Noyola y col., 2013).

1. *Tratamiento preliminar* para eliminar los residuos sólidos de gran tamaño como basura, hojas, u otros sólidos. Esto se logra mediante el uso de mallas o cribas. Esta etapa incluye también el proceso de

desarenización, en el que la arena contenida en las aguas de deshecho se separa del fluido a fin de prevenir daños o atasco en equipos utilizados para tratamientos posteriores.

2. *Tratamiento primario* en el que las aguas residuales en donde las partículas más pesadas (sólidos suspendidos) se precipitan en el fondo y los más ligeros flotan en la superficie. De esta manera el agua es preparada para los tratamientos biológicos.
3. En el *Tratamiento secundario* o *biológico* la materia orgánica disuelta en el agua residual se descompone mediante procesos biológicos. En esta etapa, los microorganismos consumen los contaminantes orgánicos y los convierten en sustancias menos nocivas. De esta manera se elimina la mayor carga de materia orgánica y diversos patógenos. En esta etapa son habituales los sistemas de lodos activados, filtros percoladores o reactores de biopelícula.
4. El *tratamiento terciario* o también llamado *avanzado* corresponde a la etapa final en PTAR. Los tratamientos terciarios se centran en contaminantes que no pudieron degradarse o eliminarse en etapas anteriores. Estos contaminantes incluyen nutrientes (como nitrógenos o fósforo), metales pesados, así como los CE que se mencionaron anteriormente. Dentro de este tipo de tratamientos se encuentran la filtración, tratamiento químico, fotocátalisis, entre otros que buscan mejorar la calidad del agua mediante diferentes principios físicos.
5. *Desinfección*: el agua tratada se somete a un proceso de desinfección que generalmente se realiza con cloro, ozono o luz ultravioleta. Esto permite eliminar los patógenos restantes. Después de la desinfección, el agua está en condiciones de reincorporarse al ambiente (verterse en ríos, lagos u océanos) o reutilizarse para fines específicos. Dichos fines estarán dados con base en el índice de calidad del agua, bajo el cual se determinará para qué aplicaciones se puede o no utilizar el agua (tanto para uso doméstico como forestal/agrícola).

180

Es importante resaltar que los lodos obtenidos de los tratamientos primarios y secundarios se puede postprocesar mediante diferentes métodos (digestión, deshidratación, compostaje, entre otros) para reducir su volumen e impacto ambiental. Dependiendo de sus características, en ocasiones es posible tratar estos lodos para producir mejoradores de suelo o generación de biogás.

Como se puede observar, las PTAR tienen un papel importante en la salud pública, en la protección del medio ambiente y en la gestión integral del agua, por lo que representan infraestructura esencial en las sociedades actuales.

Integración de biomateriales en PTAR

La integración de los biomateriales en el tratamiento de aguas residuales puede mejorar la calidad de los efluentes mediante la remoción o degradación de contaminantes que no pueden ser tratados por los métodos convencionales. A continuación, se explica cómo podrían aplicarse estos materiales en diferentes etapas de la PTAR, aunque se pueden idear nuevas formas de integrarlos.

1. En el *pretratamiento*, los biomateriales se pueden implementar como filtros por bioadsorción. En este caso, los biofiltros podrían incrementar la retención de diferentes contaminantes (incluidos contaminantes orgánicos y metales pesados) desde el inicio del proceso. Reducir la carga de contaminantes desde una fase temprana podría mejorar la eficiencia global de la PTAR. Un aspecto para considerar es que el tamaño de partículas de agua residuales es mayor durante el pretratamiento, por lo que el biomaterial podría perder efectividad.
2. Durante el *tratamiento primario*, los biomateriales se podrían utilizar para recubrir los tanques de sedimentación con el fin de incrementar la retención de partículas en suspensión. Estos revestimientos podrían incrementar la remoción de contaminantes emergentes (incluyendo microplásticos).
3. En el *tratamiento secundario* se puede vislumbrar el uso de biomateriales como soporte y hábitat de microorganismos que puedan degradar los contaminantes (biorremediación). De esta manera, los microorganismos quedarían inmovilizados en matrices de biomateriales para descomponer contaminantes que microbios convencionales no pueden realizar por sí solas. De esta forma, los soportes biológicos proporcionan un entorno estable que favorezca su crecimiento y los proteja de condiciones adversas, mejorando la eficiencia en la biorremediación.
 - En la etapa de tratamiento avanzado se pueden implementar columnas de adsorción, como se propone en (Orozco y col., 2025).

Estas columnas puede integrarse como el proceso posterior al efluente de las PTAR para la remoción de contaminantes específicos. Una opción que lo hace más sostenible es que los biomateriales se sinteticen a partir de residuos de agroindustriales de la región. Este proceso se puede considerar independiente a una PTAR o bien incorporarse en los sistemas existentes. De igual manera, los biomateriales pueden funcionalizarse para su integración en sistemas de filtración por membrana. En este sentido, los biomateriales se pueden incorporar en los revestimientos o dentro de la matriz de las membranas. La funcionalización podría ayudar a atender las limitantes de los materiales en cuanto a selectividad o bioincrustación al tiempo de mejorar la vida útil y su eficiencia.

4. En la gestión y recuperación de lodos, los biomateriales gastados (con contaminantes adsorbidos) podrían tratarse como parte de la gestión de lodos ya que estos pueden compostarse al ser biodegradables y tratarse para minimizar residuos. Incluso, existe la posibilidad de que los elementos adsorbidos (como los metales) puedan recuperarse y reutilizarse, que sería un elemento adicional en la cadena de valor. Dependiendo de las características de los biomateriales usados, estos se podrían seguir reutilizando durante varios ciclos, ya que existe la posibilidad de que puedan ser sometidos a procesos de regeneración.

182

Como se puede observar, integrar biomateriales en PTAR puede mejorar la remoción o degradación de contaminantes, la eficiencia de la PTAR, así como las prácticas en cuanto a gestión sostenible del agua. Esto se puede lograr ya que estas tecnologías se pueden integrar de forma modular o implican adaptaciones menores, y complementan los métodos existentes.

Resultados y potencial a largo plazo

En esta sección se presentan algunos resultados que se han obtenido a nivel laboratorio del tratamiento del efluente de la PTAR de Pichátaro mediante la implementación de la bioadsorción. La comunidad cuenta con una PTAR que incluye pretratamiento físico, dos lagunas de maduración (anaerobia y facultativa), tuberías de interconexión y equipos, con una capacidad de 7 L/s, como se muestra en la Figura 10. Esta está situada a

19.56 N, 101.79 O. El efluente de la PTAR aún no se ha utilizado de forma específica. Durante las sequías, se utiliza para regar cultivos, principalmente cereales. Puesto que la PTAR carece de un mantenimiento adecuado, la comunidad no tenía conocimiento sobre la calidad del efluente, y si éste cumplía la normativa vigente en materia de reutilización de agua. Para atender esta necesidad de la localidad, fue necesario evaluar la calidad del efluente. Los resultados obtenidos determinarán las características del agua, así como la posibilidad de que la comunidad pueda reutilizar con seguridad este efluente en sistemas de riego de cultivos, invernaderos, para el cultivo de especies forestales, viveros y huertos residenciales. Esto es especialmente importante debido a la limitada distribución de agua en toda la comunidad. En este sentido, el objetivo principal fue primeramente evaluar la calidad del efluente de la PTAR para posteriormente implementar una tecnología sostenible (bioadsorción) para mejorar su calidad. De esta manera, sería posible la optimización de los recursos hídricos mediante la utilización del flujo de permealdo (posterior al proceso de bioadsorción) en los procesos agrícolas.



Figura 10. (a) PTAR ubicada en San Francisco Pichátaro. (b) Vista de las lagunas. (c) Entrada a la PTAR. (d) Vista aérea. Imagen tomada de (Orozco y col., 2025).

Para ello, se desarrollaron bioadsorbentes activados a partir de residuos de aguacate (ver Figuras 6 y 7), ya que los residuos de aguacate representan 34 toneladas métricas al día en el municipio de Tingambato. Para la evaluación de la calidad del agua que entra a la PTAR, del agua que sale de la PTAR, y del agua posterior al proceso de bioadsorción (permeado) se utilizó el índice de calidad del agua (Orozco y col., 2025). La configuración experimental de la columna de adsorción se puede consultar en la Figura 9. Para los experimentos se evaluaron biomateriales a partir de piel de aguacate (BAP), de la semilla de aguacate (BAS), así como un carbón activado de coco comercial (BAC).

La Figura 11 muestra el ICA para el influente y efluente de la PTAR, así como del flujo de permeado utilizando los tres bioadsorbentes activados (BAS, BAP y BAC). Como se puede observar, el influente tiene un ICA de 25, lo que corresponde a un agua muy contaminada. Después de ser tratada en la PTAR de San Francisco Pichátaro (efluente de la PTAR), el ICA aumenta ligeramente a 30 pero, aun así, es inaceptable para el consumo humano. En esta condición, el agua sólo podría utilizarse en el sector agrícola para cultivos resistentes, como forrajes. Por su parte, los ICA para los flujos de permeado utilizando bioadsorbentes BAS, BAP y BAC aumentó significativamente a 68, 71 y 53, respectivamente. Es decir, los mayores ICA se obtienen para los flujos de permeado utilizando los biomateriales propuestos BAS y BAP, obtenidos a partir de residuos de aguacate de la región. Esto puede atribuirse a las mejores propiedades superficiales de los bioadsorbentes sintetizados, como la porosidad y la afinidad para la eliminación o minimización de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Es importante señalar que estos resultados son significativos para la aplicación de biomateriales activados como una tecnología sostenible y eficaz para mejorar la calidad del agua tratada.

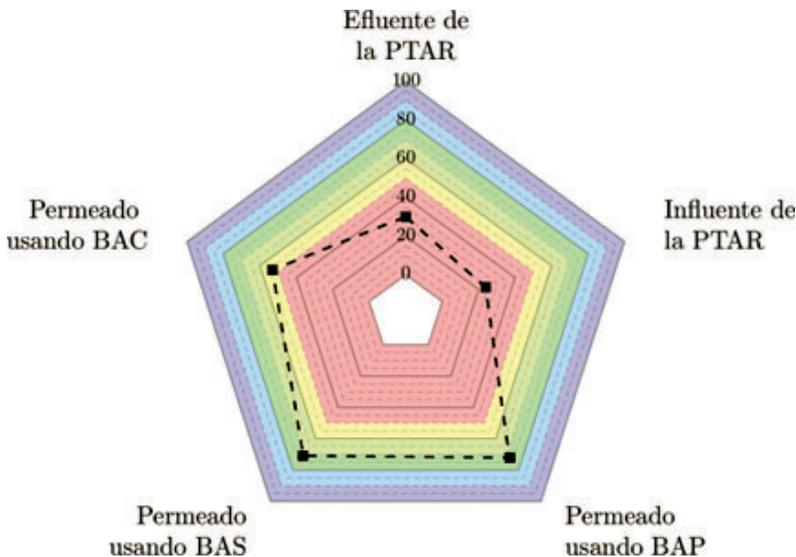
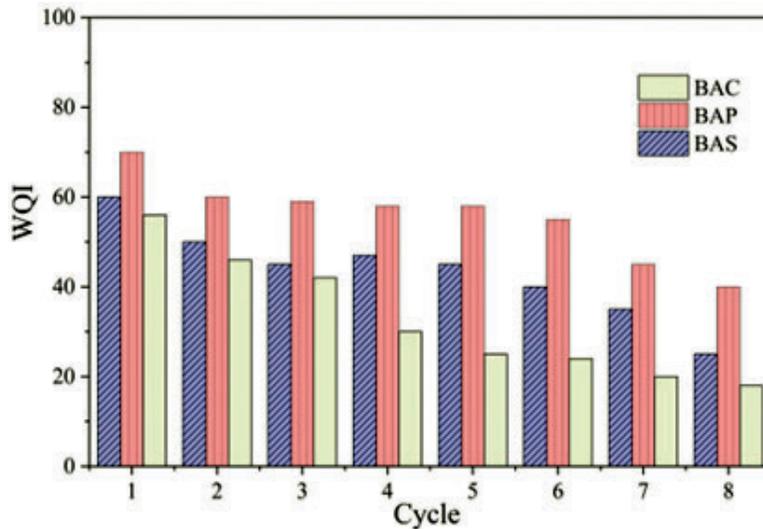


Figura 11. Índice de calidad del agua para el influente y efluente de la PTAR de Pichátaro, así como de los permeados utilizando BAS, BAP y BAC como bioadsorbentes. Imagen modificada de (Orozco y col., 2025).

La Figura 12 muestra el ICA para los flujos de permeado utilizando los bioadsorbentes activados BAS, BAP y BAC para ocho ciclos continuos de 0.09 L cada uno. En esta figura podemos observar que el ICA disminuye después del segundo ciclo para todos los bioadsorbentes, siendo más pronunciado para el carbón activado comercial. El ICA del bioadsorbente BAC disminuyó de 56% en el primer ciclo a 40% en el cuarto ciclo y a 18% en los ciclos siguientes. Por el contrario, los bioadsorbentes BAS y BAS mostraron rendimientos superiores, en los que el ICA disminuyó de 70% a 45% para BAP y de 60% a 35% para BAS después de 7 ciclos. Esto puede explicarse por la saturación del bioadsorbente, que resulta de la elevada carga de contaminantes en el efluente de la PTAR. Sin embargo, cabe señalar que los bioadsorbentes demuestran sistemáticamente una eliminación eficaz de contaminantes después de ocho ciclos.



186

Figura 12. Índice de calidad del agua para los permeados utilizando BAS, BAP y BAC como bioadsorbentes para 8 ciclos continuos (usando un volumen de 0.9 L). Imagen tomada de (Orozco y col., 2025).

Como resultado de este trabajo, se puede concluir que el bioadsorbente activado se erige como una tecnología sostenible con potencial para aumentar la calidad del efluente de las PTAR, permitiendo así su reutilización segura, la integridad de los ecosistemas, y salvaguardando la salud pública.

Desafíos y perspectivas futuras

Aunque el uso de biomateriales en la remediación de agua representa una opción viable, también plantea diversos retos que deben atenderse para llevarlos a la práctica a gran escala. A continuación, se mencionan algunos de los retos y perspectivas en el uso de biomateriales.

Desafíos del uso de biomateriales en la restauración del agua

- *Consistencia en el rendimiento y calidad:* La variabilidad en la composición, superficie y capacidad de adsorción de los biomateriales derivado de su composición (variabilidad natural de las fuentes) puede

implicar inconsistencias en cuanto a su eficacia. Esto requiere del desarrollo de estándares en la síntesis que garanticen la reproducibilidad, lo que puede representar complejo en biomateriales.

- *Escalabilidad y limitaciones de suministro:* Aunque a escala de laboratorio la síntesis de los materiales es factible, satisfacer las necesidades de llevarlo a casos reales es todo un reto en cuanto a garantizar el suministro que permita satisfacer las necesidades inherentes. El abastecimiento sostenible y continuo de biomateriales podría provocar escasez en el suministro o presiones medioambientales no previstos. De igual manera, el aumento en los costos debe ser un aspecto que se debe considerar.
- *Vida útil limitada y problemas de regeneración:* Aunque la biodegradabilidad de los biomateriales es una propiedad deseable para su disposición final, esta misma propiedad puede limitar su vida útil en las PTAR. En cuanto a regeneración (como la desorción), ésta puede ser difícil y costosa, ya que se podrían requerir tratamientos químicos complejos, limitando su aplicación práctica.
- *Afinidad selectiva y mezclas complejas de contaminantes:* Los biomateriales suelen tener afinidad con contaminantes específicos. Sin embargo, en aplicaciones reales, las aguas residuales pueden ser mezclas complejas para los que un biomaterial puede no ser eficiente. Esto puede requerir diseñar biomateriales compuestos o funcionalizarlos para atender las diferentes limitaciones.
- *Coste y viabilidad económica:* El diseño de biomateriales debe considerar que estos sean viables económicamente y con eficacias similares a otros métodos convencionales, particularmente para su aplicación industrial.

187

Adicional a las cuestiones técnicas en cuanto al desarrollo de biomateriales, es importante considerar que para la correcta consecución de proyectos aplicados es necesaria la colaboración de la sociedad y el gobierno. Esto es particularmente relevante en comunidades con autogobierno, ya que ellas gestionan todos sus recursos.

Colaboración academia-gobierno-sociedad

La colaboración entre la academia, las comunidades indígenas autoorganizadas y el gobierno es esencial para la gestión integral del agua. Esto

aplica para cualquier localidad, pero cobra importancia sobre todo en regiones en donde se tienen problemas en la calidad del agua, o bien que existe la posibilidad de contaminación por las actividades de la región. Independientemente de la situación de cada localidad, la calidad del agua está entrelazada de forma ubicua con factores sociales, culturales y ambientales.

La aportación, visión y perspectivas que cada uno de los grupos (academia-gobierno-sociedad) tiene en la gestión integral del recurso hídrico (y en general de cualquier otro proyecto) es única. Las instituciones de educación y centro de investigación aportan conocimientos científicos, las comunidades ofrecen saberes locales, prácticas sostenibles, y tradiciones⁸ en torno al agua (en sus diferentes dimensiones), y las diferentes entidades gubernamentales contribuyen en establecer el marco regulatorio (leyes y normas que se deben cumplir) en materia de manejo sustentable del agua, las medidas para garantizar su cumplimiento, así como mecanismos de financiamiento o incentivos para poder alcanzar los objetivos que se planteen. Este enfoque colaborativo busca generar la sinergia necesaria entre estas tres entidades para incrementar el impacto de los proyectos, sin dejar de lado el aspecto ambiental (inherente al agua) y la industria.

- *Rol de la academia en el conocimiento e innovación:* La contribución principal de las instituciones de educación superior y centros de investigación se centra en el desarrollo y optimización de tecnologías para el desarrollo de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, en la síntesis de nuevos materiales y métodos de remediación, así como en la integración de estos desarrollos en sistemas reales. Los académicos contribuyen mediante la investigación rigurosa, pero también en estudios en plantas piloto, experiencia en el análisis de contaminantes presentes en agua, así como en la disponibilidad de infraestructura para la realización de los análisis

8 En las culturas prehispánicas, el agua tiene una importancia fundamental en su cosmovisión. Por ejemplo, para los Mayas, el agua es un elemento que conecta el mundo físico con el mundo espiritual (se puede ver el Xibalbá al que podía accederse por los cenotes), y que, por tanto, es vital para la existencia, la fertilidad y funciones dentro de su cultura y visión del mundo. En su cosmovisión, el agua está estrechamente vinculada con la creación y transformación. De igual manera, en la cosmovisión de la cultura Purépecha el agua no era sólo vital para la subsistencia, sino que está vinculada con la relación entre el ser humano y la tierra, el cielo y los dioses. Un ejemplo es el Lago de Pátzcuaro, que es considerado un lugar sagrado asociado con los espíritus de los muertos.

correspondientes. Cuando se logra la sinergia con las comunidades, todo ese conocimiento se puede adaptar a los problemas locales mediante soluciones específicas, respetando los saberes y tradiciones de la comunidad. Un aspecto no menos importante en el área ambiental es la posibilidad de brindar mayores oportunidades educativas en los diferentes niveles que van desde talleres y ferias en educación básica para fomentar las vocaciones científicas y cultura ambiental, hasta el entrenamiento en el uso de equipo especializado o en la capacitación de miembros de la comunidad que puedan realizar las actividades de manera independiente y proactiva.

- *Rol de la comunidad en la sostenibilidad y en sus saberes:* Las comunidades indígenas poseen una riqueza cultural inestimable, que se transmite principalmente de manera oral, y que está relacionada intrínsecamente con el medioambiente. Este conocimiento ancestral incluye una comprensión matizada de la tierra, las fuentes de agua, así como de las prácticas sostenibles para su uso. Puesto que el agua tiene un rol clave en su cosmovisión, las comunidades suelen estar muy interesadas en su conservación y gestión adecuada. La colaboración con la academia y el gobierno les permite compartir su conocimiento, que puede incluir métodos tradicionales para la purificación mediante el uso de plantas locales, y que en conjunto se identifiquen prácticas de gestión del agua que sean culturalmente adecuadas. Es decir, que las soluciones que se planteen estén en armonía con los valores y tradiciones de la comunidad, fomentando la soberanía de las comunidades y aumentando la posibilidad de que las tecnologías sean realmente apropiadas por la comunidad.
- *Papel del gobierno en la política, la financiación y la aplicación:* El apoyo gubernamental se puede agrupar en tres rubos: i) financiación de proyectos que permitan adquirir nuevas tecnologías, mejora en la infraestructura y educación que de otro modo serían inaccesibles para las comunidades; ii) establecimiento de normatividad en aspectos de gestión del agua y el seguimiento para cumplir con dichas normas incorporando aspectos para reconocer y atender las necesidades locales respetando la identidad de la comunidad; y iii) fomentando iniciativas que incentiven la realización de los proyectos integrales en colaboración con la academia. En todo momento se debe garantizar que la normatividad garantice la normativa medioambiental vigente.

- *Colaboración intersectorial para generar confianza y eficacia:* Se debe trabajar de manera conjunta para buscar y facilitar la generación de espacios de discusión en los que converjan todos los actores estratégicos y que los resultados que de allí emanen tengan un impacto duradero. La colaboración entre la academia, comunidad y gobierno es capaz de derribar barreras y garantizar que todas las voces sean escuchadas para tomar decisiones mejor informadas y más incluyentes. Esta colaboración fomentaría un sentido de responsabilidad compartida necesaria para la ejecución de los proyectos.

Conclusiones

190

Los avances en la ciencia e ingeniería de materiales, que incluyen el desarrollo de nanocompuestos o su funcionalización, son prometedores para mejorar las propiedades fisicoquímicas de los materiales y, por lo tanto, su eficacia en la remoción de contaminantes y resistencia. Los biomateriales pueden integrarse en los sistemas de tratamiento de aguas residuales actuales en diferentes formas. Un ejemplo corresponde a las columnas de adsorción, que pueden implementarse como un paso complementario al tratamiento de aguas residuales, que permitieron aumentar la calidad del efluente de una PTAR ubicada en la comunidad de San Francisco Pichátaro. Sin embargo, existen diferentes biomateriales y configuraciones que podrían incorporarse. Un aspecto relevante de los biomateriales es que éstos se pueden sintetizar a partir de residuos agrícolas de la región, lo que es posible minimizar el impacto ambiental de estas tecnologías y de manera simultánea atender otro problema internacional: el manejo de residuos. Esta característica podría representar una opción viable para comunidades en regiones remotas, en los que los biomateriales podrían ofrecer una solución asequible y sostenible.

El creciente énfasis por desarrollar e implementar tecnologías sostenibles podría impulsar políticas e incentivos que favorezcan la adopción de sistemas basados en biomateriales. Tal es el caso del tratamiento de aguas residuales, en donde los gobiernos están apoyando cada vez con mayor interés, proyectos relacionados con el manejo integral del recurso hídrico ante la evidente problemática por el acceso al agua de calidad. Esto podría facilitar proyectos a escala piloto y aplicaciones reales. Es decir, aunque los biomateriales enfrentan retos para su escalamiento, los avances tec-

nológicos y de investigación aunados con la priorización de cuestiones medioambientales, hace cada vez más viable el uso de bioadsorbentes.

Finalmente, es importante reconocer que se debe trabajar de manera conjunta para buscar y facilitar la generación de espacios de discusión en los que converjan todos los actores estratégicos. A través de esta colaboración los proyectos sobre el manejo integral del agua contribuyen en el fortalecimiento de la resiliencia de las comunidades.

Agradecimientos

S. Orozco agradece al CONAHCYT por la beca Posdoctoral de Consolidación M1 y M2 (I1200/320/2022). Este trabajo recibió apoyo del ICTI Proyectos PICIR23-004 y FCCHTI23-ME-4.1.-0027, así como de la UNAM-DGAPA-PAPIIT Proyecto IA103623 y UNAM-DGAPA-PAPIME Proyecto PE109024.

Referencias

- Aguilar-Aguilar, A., de León-Martínez, L. D., Forgionny, A., Acelas Soto, N. Y., Mendoza, S. R., & Zárate-Guzmán, A. I. (2023). A systematic review on the current situation of emerging pollutants in Mexico: A perspective on policies, regulation, detection, and elimination in water and wastewater. *Science of the Total Environment*, 905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167426>
- Alardhi, S. M., Ali, N. S., Saady, N. M. C., Zendejboudi, S., Salih, I. K., Alrubaye, J. M., & Albayati, T. M. (2024). Separation techniques in different configurations of hybrid systems via synergetic adsorption and membrane processes for water treatment: A review. *En Journal of Industrial and Engineering Chemistry (Vol. 130, pp. 91–104)*. Korean Society of Industrial Engineering Chemistry. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.09.051>
- Albaseer, S. S., Al-Hazmi, H. E., Kurniawan, T. A., Xu, X., Abdulrahman, S. A. M., Ezzati, P., Habibzadeh, S., Hollert, H., Rabiee, N., Lima, E. C., Badawi, M., & Saeb, M. R. (2024). Microplastics in water resources: Global pollution circle, possible technological solutions, legislations, and future horizon. *En Science of the Total Environment (Vol. 946)*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173963>

- Al-Gethami, W., Qamar, M. A., Shariq, M., Alaghaz, A. N. M. A., Farhan, A., Areshi, A. A., & Alnasir, M. H. (2024). Emerging environmentally friendly bio-based nanocomposites for the efficient removal of dyes and micropollutants from wastewater by adsorption: a comprehensive review. *En RSC Advances* (Vol. 14, Número 4, pp. 2804–2834). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d3ra06501d>
- Aminul Islam, M., Nazal, M. K., Sajid, M., & Altahir Suliman, M. (2024). Adsorptive removal of paracetamol from aqueous media: A review of adsorbent materials, adsorption mechanisms, advancements, and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 396. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.123976>
- Asghar, A., Mabarak, S., Ashraf, B., Rizwan, M., Massey, S., Asghar, B. H., Shahid, B., & Rasheed, T. (2024). A sustainable approach for the removal of chlorpyrifos pesticide from aqueous phase using novel nano magnetized biochar. *Inorganic Chemistry Communications*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111790>
- Calore, F., Badetti, E., Bonetto, A., Pozzobon, A., & Marcomini, A. (2024). Non-conventional sorption materials for the removal of legacy and emerging PFAS from water: A review. *En Emerging Contaminants* (Vol. 10, Número 3). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100303>
- Chahouri, A., Dafouf, S., Elkassbi, M., El Mansouri, B., & Banaoui, A. (2024). Hydrocarbon contamination along Morocco's coastlines: Presence, impact, evaluation, and mitigation. *En Regional Studies in Marine Science* (Vol. 77). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103700>
- Ding, C., Ding, Z., Liu, Q., Liu, W., & Chai, L. (2024). Advances in mechanism for the microbial transformation of heavy metals: implications for bioremediation strategies. *Chemical Communications*, 60(85), 12315–12332. <https://doi.org/10.1039/d4cc03722g>
- Ezeorba, T. P. C., Okeke, E. S., Nwankwo, C. E., Emencheta, S. C., Enochoghene, A. E., Okeke, V. C., & Ozougwu, V. E. O. (2024). Emerging eco-friendly technologies for remediation of Per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) in water and wastewater: A pathway to environmental sustainability. *Chemosphere*, 364. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143168>
- Fakhri, V., Hamzehlouy, A., Janmaleki Dehchani, A., Moradi, E., Tavakoli Dare, M., Jafari, A., & Khonakdar, H. A. (2024a). Green solutions for

- blue waters: Using biomaterials to purify water from microplastics and nanoplastics. En *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 65). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105854>
- Fakhri, V., Hamzehlouy, A., Janmaleki Dehchani, A., Moradi, E., Tavakoli Dare, M., Jafari, A., & Khonakdar, H. A. (2024b). Green solutions for blue waters: Using biomaterials to purify water from microplastics and nanoplastics. En *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 65). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105854>
- Gonçalves, J. O., Strieder, M. M., Silva, L. F. O., dos Reis, G. S., & Dotto, G. L. (2024). Advanced technologies in water treatment: Chitosan and its modifications as effective agents in the adsorption of contaminants. En *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 270). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132307>
- Guettai, N., Kadmi, Y., Puri, M., Kerkich, K., & Bouargane, B. (2024). Occurrence, analysis and removal processes of emerging pharmaceuticals from waters for the protection and preservation of a sustainable environment: A review. *Journal of Cleaner Production*, 466. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142654>
- Hussain, M. K., Khatoun, S., Nizami, G., Fatma, U. K., Ali, M., Singh, B., Quraishi, A., Assiri, M. A., Ahamad, S., & Saquib, M. (2024). Unleashing the power of bio-adsorbents: Efficient heavy metal removal for sustainable water purification. En *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 64). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105705>
- Ighalo, J. O., Adeniyi, A. G., & Adelodun, A. A. (2021). Recent advances on the adsorption of herbicides and pesticides from polluted waters: Performance evaluation via physical attributes. En *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (Vol. 93, pp. 117–137). Korean Society of Industrial Engineering Chemistry. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.10.011>
- ILAC. (2021). Porcentaje de aguas residuales generadas que reciben tratamiento. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/indicadores_ilac18/indicadores/o2_gestion/2.4.1.1.html
- Jaffar, F. H., Othman, M. H. D., Ismail, N. J., Puteh, M. H., Kurniawan, T. A., Abu Bakar, S., & Abdullah, H. (2024). Hydroxyapatite-based materials for adsorption, and adsorptive membrane process for heavy metal removal from wastewater: Recent progress, bottleneck and opportunities. En *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engi-*

neers (Vol. 164). Taiwan Institute of Chemical Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105668>

Javed, S., Zulfqar, Z., Fatima, Z., Muhammad, G., Hussain, M. A., Mush-taq, M., & Haseeb, M. T. (2024). A comprehensive review of plant-based mucilages as promising candidates for water remediation. En *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 12, Número 5). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114035>

Jiménez, A., Trujillano, R., Rives, V., Vicente, M. A., & Gil, A. (2024). Removal of heavy metals from aqueous solutions by adsorption on zeolites synthesized from aluminum saline slags. *Inorganic Chemistry Communications*, 113440. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113440>

Karimi-Maleh, H., Atigh, Z. B. Q., Sadeghifar, H., Najafi, M., Rajendran, S., Ayati, A., Chinnathambi, A., Dragoi, E. N., & Kalikeri, S. (2023). Shifting paradigms in PFAS resin removal with biomaterial alternatives. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105300>

194 Kausar, A., Zohra, S. T., Ijaz, S., Iqbal, M., Iqbal, J., Bibi, I., Nouren, S., El Messaoudi, N., & Nazir, A. (2023). Cellulose-based materials and their adsorptive removal efficiency for dyes: A review. En *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 224, pp. 1337–1355). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.220>

Khanzada, A. K., Al-Hazmi, H. E., Kurniawan, T. A., Majtacz, J., Piechota, G., Kumar, G., Ezzati, P., Saeb, M. R., Rabiee, N., Karimi-Maleh, H., Lima, E. C., & Maĳinia, J. (2024). Hydrochar as a bio-based adsorbent for heavy metals removal: A review of production processes, adsorption mechanisms, kinetic models, regeneration and reusability. En *Science of the Total Environment* (Vol. 945). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173972>

Lei, X., Lian, Q., Zhang, X., Karsili, T. K., Holmes, W., Chen, Y., Zappi, M. E., & Gang, D. D. (2023). A review of PFAS adsorption from aqueous solutions: Current approaches, engineering applications, challenges, and opportunities. En *Environmental Pollution* (Vol. 321). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121138>

Lukášová, D., Biela, R., & Moravčiková, S. (2022). Adsorption capacity assessment for selected adsorbents in the removal of over the counter (OTC) analgesics from water. *Desalination and Water Treatment*, 274, 159–172. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28911>

- Mahajan, P., Jaspal, D., & Malviya, A. (2023). Adsorption of dyes using custard apple and wood apple waste: A review. En *Journal of the Indian Chemical Society* (Vol. 100, Número 3). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2023.100948>
- Mehmood, T., Mustafa, B., Mackenzie, K., Ali, W., Sabir, R. I., Anum, W., Gaurav, G. K., Riaz, U., Liu, X., & Peng, L. (2023). Recent developments in microplastic contaminated water treatment: Progress and prospects of carbon-based two-dimensional materials for membranes separation. *Chemosphere*, 316. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137704>
- Mousazadehgavan, M., Khademi, S., Naeini, A. M., Yoosefdoost, I., Vashisht, V., Hashemi, M., Manouchehri, M., & Hashim, K. (2024). Fate of micro- and nanoplastics in water bodies: A critical review of current challenges, the next generation of advanced treatment techniques and removal mechanisms with a special focus on stormwater. En *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 67). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106159>
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2013). Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales (1a ed.). Instituto de Ingeniería.
- Orozco, S., Espino, J., & Rivero, M. (2024a, febrero). Materiales a partir de residuos agroindustriales de aguacate para la remoción de contaminantes en agua. *Revista Materiales Avanzados*, 40, 79–83.
- Orozco, S., Espino, J., & Rivero, M. (2024b, agosto). Materiales para la remoción de contaminantes emergentes presentes en agua. *Revista Materiales Avanzados*, 41, 168–173.
- Orozco, S., López-Sosa, B., Montiel, E., Espino, J., Guerra, R., Vargas, J., Alfonso, I., & Rivero, M. (2025). Green Practices in Wastewater Treatment: Upcycling Avocado Waste for Enhanced Water Sanitation. Case Study: WWTP in San Francisco Pichátaro, Michoacán. *Results in Engineering*.
- Orozco, S., Montiel, E., Valencia, J. E., González, R. G., del Carmen Chávez Parga, M., Cortés, J. A., & Rivero, M. (2024). Effective RhB Dye Removal Using Sustainable Natural Bioadsorbents Synthesized from Avocado Seed and Skin. *Water, Air, and Soil Pollution*, 235(2). <https://doi.org/10.1007/s11270-024-06952-6>
- Orozco, S., Rivero, M., Suárez-Parra, R., Téllez, M., & Arancibia-Bulnes, C. A. (2022). Theoretical–Experimental Methodology for Designing

Hybrid Photocatalytic Reactors. *Topics in Catalysis*, 65(9–12), 1000–1014. <https://doi.org/10.1007/s11244-022-01677-4>

Osman, A. I., Zhang, Y., Farghali, M., Rashwan, A. K., Eltaweil, A. S., Abd El-Monaem, E. M., Mohamed, I. M. A., Badr, M. M., Ihara, I., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2024). Synthesis of green nanoparticles for energy, biomedical, environmental, agricultural, and food applications: A review. *En Environmental Chemistry Letters* (Vol. 22, Número 2, pp. 841–887). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01682-3>

Priya, E., Kumar, S., Verma, C., Sarkar, S., & Maji, P. K. (2022). A comprehensive review on technological advances of adsorption for removing nitrate and phosphate from waste water. *En Journal of Water Process Engineering* (Vol. 49). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103159>

Ramos, J. L., Monteiro, J. O. F., dos Santos, M. S., Labuto, G., & Carrilho, E. N. V. M. (2022). Sustainable alternative for removing pesticides in water: Nanomodified activated carbon produced from yeast residue biomass. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100794>

Rashid Ahmed, H., Kayani, K. F., Mary Ealias, A., & George, G. (2024). Biochar as an eco-friendly adsorbent for ibuprofen removal via adsorption: A review. *En Inorganic Chemistry Communications* (Vol. 170). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113397>

Şenol, Z. M., El Messaoudi, N., Ciğeroglu, Z., Miyah, Y., Arslanoğlu, H., Bağlam, N., Kazan-Kaya, E. S., Kaur, P., & Georgin, J. (2024). Removal of food dyes using biological materials via adsorption: A review. *En Food Chemistry* (Vol. 450). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139398>

Sirajudheen, P., Poovathumkuzhi, N. C., Vigneshwaran, S., Chelaveetil, B. M., & Meenakshi, S. (2021). Applications of chitin and chitosan based biomaterials for the adsorptive removal of textile dyes from water — A comprehensive review. *En Carbohydrate Polymers* (Vol. 273). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118604>

Venkatesh Reddy, C., Kumar, R., Chakraborty, P., Karmakar, B., Pottipati, S., Kundu, A., & Jeon, B. H. (2024). A critical science mapping approach on removal mechanism and pathways of per- and poly-fluoroalkyl substances (PFAS) in water and wastewater: A comprehen-

sive review. En *Chemical Engineering Journal* (Vol. 492). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152272>

Zheng, X., Alam, O., Zhou, Y., Du, D., Li, G., & Zhu, W. (2024). Heavy metals detection and removal from contaminated water: A critical review of adsorption methods. En *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 12, Número 6). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114366>

BLOQUE 3
GESTIÓN DE RESIDUOS
Y BIOENERGÍA

BIOENERGÍA Y DESARROLLO COMUNITARIO: PROYECTO LOCAL PARA LA AUTOSUFICIENCIA ENERGÉTICA COMO ESTRATEGIA EN MATERIA DE EDUCACIÓN AMBIENTAL

Mario Morales Máximo

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Mújica SN, Ciudad Universitaria, Morelia 58040, Michoacán, Mexico Email: mmoralesmaximo@gmail.com

Resumen

Este capítulo explora la relación entre bioenergía y desarrollo comunitario a través de un proyecto local enfocado en la autosuficiencia energética, se analiza cómo la implementación de tecnologías para el aprovechamiento de residuos de biomasa puede contribuir a la generación de bioenergía, no solo a la mejora de las condiciones energéticas de una comunidad, sino también a la educación ambiental y la concientización sobre el uso sostenible de los recursos; a través de un enfoque participativo, se detalla la metodología utilizada, los resultados obtenidos y su discusión, destacando la importancia de integrar la bioenergía en el contexto de la educación ambiental para fomentar un desarrollo sostenible y empoderar a las comunidades.

Palabras clave: bioenergía, desarrollo comunitario, educación ambiental.

Introducción

La búsqueda de fuentes de energía sostenibles se ha convertido en una necesidad apremiante en el contexto actual de cambio climático y agotamiento de recursos fósiles (Kuhl, 2020). En este sentido, la bioenergía emerge como una alternativa viable, que no solo permite la generación de energía, sino que también puede impulsar el desarrollo comunitario y fomentar prácticas sostenibles a nivel local (Kothari et al., 2020). Este

capítulo tiene como objetivo analizar un proyecto local que busca establecer la autosuficiencia energética en una comunidad a través de la implementación de biocombustibles sólidos para generación de bioenergía (Morales-Máximo et al., 2020b). A través de este proyecto, se busca no solo satisfacer las necesidades energéticas de la comunidad, sino también promover la educación ambiental y la concientización sobre el uso responsable de los recursos.

La educación ambiental desempeña un papel crucial en la promoción de un cambio de comportamiento hacia prácticas más sostenibles (Sierra et al., 2016). Al integrar la bioenergía y biocombustibles en los programas educativos, se crea una oportunidad para que las comunidades aprendan sobre las ventajas de utilizar recursos renovables y la importancia de la sostenibilidad (Jos et al., 2020). Además, el desarrollo de proyectos de bioenergía en comunidades locales puede contribuir a la generación de empleo, la mejora de la calidad de vida y el empoderamiento de los habitantes, fomentando su participación activa en la gestión de recursos (Morales-Máximo et al., 2019).

202

En comunidades rurales, la falta de acceso a fuentes de energía confiables puede limitar el desarrollo social y económico. Al fomentar la producción y el uso de biocombustibles sólidos para la generación de bioenergía, es posible no solo satisfacer las necesidades energéticas, sino también generar empleo, promover la equidad social y fortalecer la cohesión comunitaria. A través de la educación ambiental, los habitantes adquieren las herramientas necesarias para gestionar sus recursos de manera eficiente y sostenible, impulsando un cambio cultural hacia la autosuficiencia energética.

Metodología

La metodología del proyecto se basa en un enfoque participativo que involucra a los miembros de la comunidad en cada etapa del proceso. A continuación, se describen las fases del proyecto:

Diagnóstico participativo

El primer paso del proyecto consiste en realizar un diagnóstico participativo para identificar las necesidades energéticas de la comunidad y los recursos disponibles. Esta fase incluye:

- **Reuniones comunitarias:** Se organizan encuentros con los miembros de la comunidad para discutir las problemáticas energéticas y recopilar información sobre sus hábitos de consumo energético.
- **Encuestas y entrevistas:** Se aplican encuestas y se realizan entrevistas a los habitantes para obtener datos cuantitativos y cualitativos sobre el acceso a fuentes de energía, costos y experiencias previas con biocombustibles.
- **Análisis de recursos locales:** Se evalúan los recursos disponibles en la comunidad, como residuos maderables, forestales y orgánicos, que pueden utilizarse para la producción de biocombustibles sólidos.

Este diagnóstico permite obtener un panorama claro de la situación energética de la comunidad y establecer las bases para la implementación del proyecto.

Formación y capacitación

203

Una vez completado el diagnóstico, se procede a la fase de formación y capacitación. Esta etapa es crucial para empoderar a los miembros de la comunidad y asegurar que estén preparados para llevar a cabo la producción de biocombustibles sólidos. Las actividades incluyen:

- **Conceptos básicos de bioenergía y biocombustibles sólidos:** Se explica qué son los biocombustibles, cómo se producen y sus beneficios en comparación con los combustibles fósiles.
- **Talleres de capacitación:** Se organizan talleres donde se enseñan técnicas de producción de biocombustibles sólidos a partir de residuos locales. Los talleres abordan temas como:
 1. Recolección de materia prima.
 2. Procesamiento y producción de biocombustibles sólidos.
 3. Uso de biocombustibles en aplicaciones domésticas y productivas.
- **Demostraciones prácticas:** Se realizan demostraciones prácticas de la producción de biocombustibles para que los participantes puedan observar y aprender de manera directa. Esto incluye la demostración de briqueteadoras y otras herramientas necesarias para el proceso.

Implementación de proyectos piloto

La fase de implementación consiste en establecer proyectos piloto en varias familias de la comunidad. Esta etapa incluye:

- **Selección de personas:** Se eligen a personas interesadas en participar en el proyecto, priorizando aquellas que tienen acceso a residuos que pueden ser utilizados para la producción de biocombustibles.
- **Construcción de unidades de producción:** Se construyen unidades de producción de biocombustibles sólidos en los hogares de las personas seleccionadas. Estas unidades son diseñadas para ser de fácil acceso y mantenimiento, utilizando materiales locales y técnicas apropiadas.
- **Producción de biocombustibles:** Las personas comienzan a producir biocombustibles sólidos utilizando residuos agrícolas y forestales. Se les brinda apoyo técnico durante el proceso de producción para asegurar que se sigan las mejores prácticas.
- **Beneficios ambientales y económicos:** Se discutieron los beneficios del uso de biocombustibles sólidos para el medio ambiente y la economía local, incluyendo la reducción de residuos y el ahorro en costos de energía.

204

Evaluación y monitoreo

La evaluación y monitoreo son esenciales para medir el impacto del proyecto y realizar ajustes en función de los resultados obtenidos. Esta fase incluye:

- **Indicadores de evaluación:** Establecer indicadores para medir el éxito del proyecto, como la cantidad de biocombustibles producidos, el ahorro energético y las mejoras en la calidad de vida de los participantes.
- **Encuestas periódicas:** Realizar encuestas y entrevistas a las personas participantes para recopilar información sobre su experiencia con la producción de biocombustibles, así como sobre los beneficios económicos y sociales que han observado.
- **Informe de evaluación:** Elaborar un informe que resume los hallazgos de la evaluación y proporciona recomendaciones para mejorar el proyecto en futuras implementaciones.

Difusión de resultados

La difusión de resultados es crucial para sensibilizar a la comunidad y promover la replicabilidad del proyecto. Esta fase incluye:

- **Eventos comunitarios:** El organizar eventos en los que se comparten los resultados del proyecto y se discuten las experiencias de las familias participantes. Estos eventos fomentan el intercambio de ideas y la colaboración entre los miembros de la comunidad.
- **Redes de apoyo:** Establecer redes de apoyo con otras comunidades y organizaciones interesadas en la producción de biocombustibles sólidos. Esto permite compartir conocimientos y experiencias, ampliando el impacto del proyecto.

Resultados

Los resultados del proyecto muestran un impacto significativo en diversos aspectos de la comunidad:

205

1. Diagnóstico

Los datos recopilados en esta etapa se centraron en cuantificar la generación semanal de residuos maderables en la comunidad. Se determinó el peso en kilogramos de los desperdicios maderables (aserrín y viruta), y los resultados obtenidos son los siguientes: el residuo maderable más comúnmente generado es la viruta, con una producción de 2,110 kg por semana, el 51% de los encuestados indicó que el destino final de estos residuos (ya sea viruta o aserrín) es la quema al aire libre, mientras que un 25% los comercializa, limitándose exclusivamente a la viruta, lo cual este análisis de diagnóstico cumple con su propósito de identificar los posibles residuos de una comunidad y cumple con la participación de la comunidad.

Tecnología apropiada para la producción de biocombustibles sólidos

La implementación del proyecto permitira a los participantes establecer un sistema de producción sostenible de biocombustibles sólidos. A través de la capacitación y el apoyo técnico, se pudiera lograr que cada persona pudiera producir entre 50 y 100 kilogramos de biocombustibles sólidos

al mes, utilizando principalmente residuos maderables de la comunidad .

Contempla la utilización de una máquina briquetadora, integrando plenamente la parte técnica y de bajo impacto al ambiente por los materiales de construcción. La máquina fue construida con el método de Eco-diseño, donde se plasman las necesidades energéticas de los usuarios (Morales-Máximo et al., 2020a)(Morales-Máximo et al., 2022). La máquina se construyó principalmente de componentes reciclados de acero, la máquina solo requiere mano de obra para manipular el sistema mecánico. El diseño completo y la construcción física se observa en la Figura 1.

206

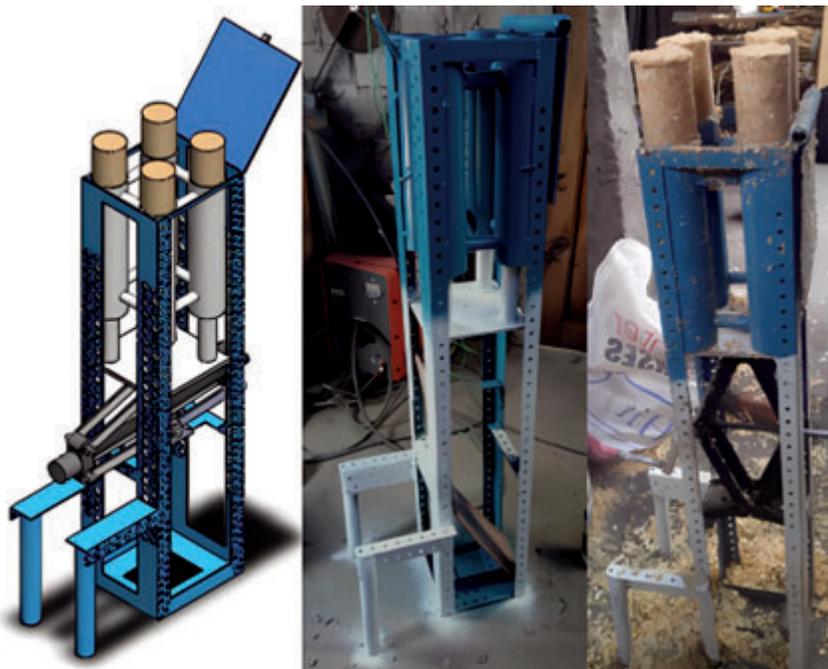


Figura 1. a) diseño terminado, b) construcción física, c) máquina en operación.

El costo de la maquina fue de \$75.44 USD, incluyendo materiales, insumos y mano de obra. Para otros diseños similares, se reportan costos entre \$220 USD (Obi et al., 2013) y \$57.02 USD (Sinha et al., 2019). En otro estudio se elaboraron briquetas de 6 cm de longitud por 5 cm de diámetro, similar a las briquetas de nuestro estudio (Morales-Máximo & Rutiaga-Quñones, 2018). La briquetadora diseñada en este estudio

es utilizada en comunidades rurales, y tiene un potencial de ser utilizada en pequeñas asociaciones, proyectos rurales de implementación o inversión privada por los miembros de la comunidad. Su costo representa una inversión aceptable y relacionada con costos similares de ecotecnologías existentes en la comunidad, por ejemplo, estufas mejoradas de leña con costos entre \$100 USD y \$200 USD. Una ventaja en la innovación es la utilización de materiales locales para su construcción y fácil operación, lo que impulsa la innovación sustentable.

Evaluación de la cocción de alimentos en un fogón de tres piedras

El funcionamiento de los dispositivos utilizados en la cocción de alimentos en la comunidad de estudio, se caracterizan por tener bajas eficiencias térmicas y combustiones incompletas (fuegos abiertos), gran parte de la energía se pierde al ambiente y se carece de chimeneas para la ventilación de los contaminantes. En muchas ocasiones se carece de buenas prácticas en el uso de biocombustibles (leña), se utiliza en dimensiones y humedades inadecuadas. A continuación, la Tabla 1 muestra la lista de alimentos (platillos más comunes de la comunidad de estudio) cocinados con las briquetas producidas en este estudio y las cuales fueron realizadas en campo.

207

Tabla 1. Cocción de platillos más comunes en la comunidad de estudio

Alimento (1 kg)	Tiempo de cocción con las briquetas (min)	Num. de briquetas utilizadas
Cocción de coliflor	48	17
Cocción de huevos	55	21
Cocción de caldo de pollo	67	25
Cocción de quelites	50	19
Cocción de caldo de pescado	62	22

Nota: Para la cocción de “huevo”, esta tarea se realizó en dos eventos, debido a que son las cantidades típicas usadas en la comunidad. El resto de los alimentos se cocinó en un evento.

La Tabla 1 muestra los tiempos de cocción de los alimentos cocinados en la comunidad rural de estudio. El platillo con el mayor tiempo de coc-

ción es el caldo de pollo, que requirió 67 minutos y utilizó 25 briquetas. Por otro lado, el platillo con el menor tiempo de cocción fue la coliflor, que se cocinó en 48 minutos utilizando 17 briquetas. Estos tiempos de cocción son comparables a los obtenidos al utilizar madera (leña), lo que sugiere que el dispositivo final presenta un rendimiento eficiente.

Participación local

La participación comunitaria, el involucramiento activo de las personas participantes ha permitido integrar sus saberes y prácticas cotidianas en cada etapa del proceso, ha sido clave para garantizar que las soluciones propuestas sean culturalmente apropiadas y sostenibles a largo plazo, la curiosidad de la comunidad sobre cómo un residuo generado diariamente en sus talleres, como el de la madera, podría transformarse en un recurso útil, despertó un interés colectivo que impulsó la investigación; este residuo, a través de procesos tecnológicos sencillos y accesibles, ha demostrado ser beneficioso, especialmente al reutilizarlo en actividades como la cocción de alimentos (veáse Figura 2) para el consumo propio, este enfoque ha permitido no solo reducir el impacto ambiental, sino también generar un valor añadido que fortalece la autosuficiencia de la comunidad y su economía local.

208



Figura 2. Cocción de alimentos.

5. Mejora de la calidad de vida

La producción y uso de biocombustibles sólidos generaron un cambio positivo en la calidad de vida de los habitantes. Se observó una disminución en la contaminación del aire en los hogares, ya que los biocombustibles sólidos son menos contaminantes en comparación con los combustibles tradicionales. Además, la reducción en la dependencia de fuentes de energía no renovables ha contribuido a una mayor seguridad energética.

El ciclo de la investigación concluye con la creación de un ciclo de producción sostenible para la comunidad como se muestra en la Figura 3.

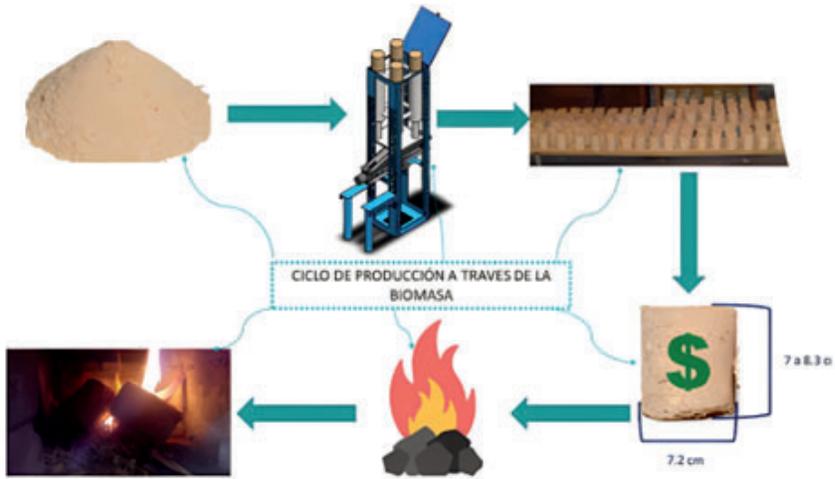


Figura 3. Ciclo de producción de briquetas en la comunidad.

La Figura 3 muestra el proceso de manera sintetizado en este caso de estudio como la comunidad rural aprovecha sus residuos biomásicos en biocombustibles sólidos, el proceso comienza con el residuo de biomasa disponible en este caso residuos maderables de Pino., posteriormente se diseña y fabrica la tecnología para la densificación, continua el proceso con la producción de briquetas hasta su uso final con fines térmicos.

Discusión

Los resultados obtenidos demuestran el potencial de los biocombustibles sólidos como una solución eficaz para abordar la autosuficiencia energética.

tica y fomentar el desarrollo comunitario. La combinación de producción de bioenergía y educación ambiental ha demostrado ser una estrategia exitosa para empoderar a las comunidades y mejorar su calidad de vida.

1. Sostenibilidad del proyecto

Uno de los aspectos más destacados del proyecto es su sostenibilidad. La producción de biocombustibles sólidos utiliza recursos locales y renovables, lo que contribuye a la conservación del medio ambiente. Además, la capacitación de los miembros de la comunidad garantiza que el conocimiento se mantenga y se transfiera a futuras generaciones.

Educación ambiental como estrategia clave

210

La educación ambiental juega un papel fundamental en la implementación de proyectos de biocombustibles. A través de la capacitación, los participantes no solo aprenden sobre la producción de biocombustibles, sino que también comprenden la importancia de gestionar sus recursos de manera responsable. Esto crea una cultura de sostenibilidad que puede perdurar a lo largo del tiempo.

Desafíos y oportunidades

A pesar de los resultados positivos, el proyecto enfrentó desafíos, como la variabilidad en la disponibilidad de materia prima y la necesidad de financiación para expandir la producción. Sin embargo, estos desafíos también representan oportunidades para buscar alianzas con organizaciones no gubernamentales, instituciones académicas y el sector privado, que pueden aportar recursos y conocimientos técnicos.

Importancia de la participación comunitaria

La participación activa de la comunidad fue crucial para el éxito del proyecto. La creación de espacios de diálogo y colaboración permitió que las voces de los miembros de la comunidad fueran escuchadas y que sus necesidades fueran tomadas en cuenta. Esto no solo aumentó el compromiso, sino que también mejoró la confianza en el proceso.

Conclusión

La implementación de un proyecto de biocombustibles sólidos y bioenergía puede ser una estrategia efectiva para lograr la autosuficiencia energética y fomentar el desarrollo comunitario. A través de un enfoque participativo, se puede transformar la manera en que las comunidades utilizan y gestionan sus recursos energéticos, promoviendo la educación ambiental y la sostenibilidad.

Los resultados obtenidos en este proyecto son una prueba del impacto positivo que la bioenergía puede tener en la vida de las personas. La capacitación, la producción local y la concienciación ambiental se combinan para crear un modelo que no solo responde a las necesidades energéticas, sino que también empodera a las comunidades para construir un futuro más sostenible.

Este capítulo demuestra que el camino hacia la autosuficiencia energética es posible y que, con la participación activa de la comunidad, se pueden superar los retos que se presentan. La replicación de este tipo de proyectos en otras localidades puede contribuir significativamente a la transición hacia un modelo energético más sostenible y equitativo.

211

Agradecimientos

Mario Morales Máximo agradece al CONAHCYT por la beca Posdoctoral de estancia académica por México Convocatoria 2023(1) (6175421). Para llevar a cabo la investigación.

Bibliografía

- Jos, A., Lima, D., Iwakiri, S., & Satyanarayana, K. G. (2020). Preparation and characterization of wood-cement particleboards produced using metakaolin, calcined ceramics and residues of *Pinus* spp. *Journal of Building Engineering*, 32(June), 101722. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101722>
- Kothari, R., Vashishtha, A., & Mohan, H. (2020). Assessment of Indian bioenergy policy for sustainable environment and its impact for rural India: Strategic implementation and challenges. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101078. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101078>

- Kuhl, L. (2020). Technology transfer and adoption for smallholder climate change adaptation: opportunities and challenges. *Climate and Development*, 12(4), 353–368. <https://doi.org/10.1080/17565529.2019.1630349>
- Morales-Máximo, M., Castro Sánchez F.J, & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2019). Estudio socioeconómico para la evaluación de biocombustibles sólidos: eficiencia energética y alterna en la comunidad de San Francisco Pichátaro, Michoacán, México. *INTERNATIONAL ENERGY CONFERENCE: IEC*, 2(2448–5624), 577–582. https://www.researchgate.net/publication/341725718_Estudio_socioeconomico_para_la_evaluacion_de_biocombustibles_solidos_eficiencia_energetica_y_alterna_en_la_comunidad_de_San_Francisco_Pichataro_Michoacan_Mexico
- Morales-Máximo, M., Ruíz-García, V. M., López-Sosa, L. B., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2020a). Exploitation of Wood Waste of Pinus spp for Briquette Production : A Case Study in the Community of San Francisco Pichátaro , Michoacán , Mexico. *Applied Sciences*, 10(8), 2933. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app10082933>
- Morales-Máximo, M., Ruíz-García, V. M., López-Sosa, L. B., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2020b). Exploitation of wood waste of Pinus spp for briquette production: A case study in the community of San Francisco Pichátaro, Michoacán, Mexico. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/APP10082933>
- Morales-Máximo, M., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2018). Aprovechamiento del aserrín de pino para la producción de briquetas como energía alterna: caracterización térmica y análisis de durabilidad por masa presente en la combustión. *Semana Nacional de Energía*, XVLL(2448–5543), 420–425.
- Morales-Máximo, M., Rutiaga-Quiñones, J. G., Masera, O., & Ruiz-García, V. M. (2022). Briquettes from Pinus spp . Residues : Energy Savings and Emissions Mitigation in the Rural Sector. *Energies*, 15(9), 3419. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en15093419>
- Obi, O. F., Akubuo, C. O., & Okonkwo, W. I. (2013). Development of an Appropriate Briquetting Machine for Use in Rural Communities. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 2(4), 578–582.
- Sierra, C. A. S., Bustamante, E. M. G., & Morales, J. del C. J. (2016). La educación ambiental como base cultural y estrategia para el desarrollo

sostenible. *Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios En Ciencias Sociales*, 18(2), 266–281.

Sinha, Y., Sahu, P., & Biswas, S. (2019). Development of Manually Operated Piston Press Type briquetting Machine. *Int.J.Curr.Microbiol.App. Sci*, 8(12), 2932–2939. <https://doi.org/https://doi.org/10.20546/ijc-mas.2019.812.340>

ESTRATEGIAS PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LAS COMUNIDADES PURÉPECHAS

**Antonio Campos de la Cruz¹, Sayra Orozco², Michel Rivero³,
L. Bernardo López-Sosa¹**

¹ Universidad Intercultural Indígena de Michoacán Carr. Pátzcuaro-Erongarícuaro km 3 (Quinta Tzípecua), Huecorio, 61613, México

² Posgrado de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, Morelia, 58060, Michoacán, México.
sorozcocerros@gmail.com

³ Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta Morelia, 58190, Michoacán, México.

215

Resumen

La gestión de residuos sólidos en las comunidades es clave para garantizar la salud de la población y de los ecosistemas, así como reducir la contaminación de los recursos hídricos, suelo y aire. En este capítulo se propone una estrategia para la gestión de residuos en comunidades que integra las etapas claves para el manejo integral de residuos como lo son el aprovechamiento y valorización, así como la planificación, desarrollo, implementación y evaluación continua de programas de educación ambiental, cuyo propósito es la concientización, sensibilización y el reconocimiento de la importancia que tiene la protección del medio ambiente. La educación ambiental y la participación de la comunidad son los pilares fundamentales que puede sostener las estrategias implementadas para la gestión de residuos, así como fomentar y promover modos de vida sostenibles en la comunidad. La inclusión de la comunidad en la planeación, desarrollo, implementación y el monitoreo continuo de las estrategias en materia de residuos preservará tradiciones culturales, la cohesión de la comunidad y la forma en que la comunidad interactúa con su entorno. Al promover prácticas de gestión de residuos, se busca no solo limpiar el entorno, sino también restaurar el vínculo entre la comunidad y su territorio.

Palabras clave: residuo, gestión, sostenibilidad, reciclaje, compostaje.

Introducción

En los últimos años el concepto de residuo aparece en múltiples fuentes de información. En este trabajo comenzaremos definiendo residuos de acuerdo con la Real Academia Española (DLE-RAE, 2024): “Residuos es aquel material que queda como como inservible después de haber realizado un trabajo u operación”.

De acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, LGPGIR (LGPGIR, 2023), residuo es el material o producto cuyo propietario o poseedor desecha, que puede estar en estado sólido o semisólido, líquido o gaseoso y que se contiene en depósitos. Los residuos pueden ser susceptibles a valorizarse o requieren someterse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en la misma LGPGIR (DOF, 2023).

216



Figura 1. Clasificación de residuos de acuerdo con la LGPGIR.

Los residuos se pueden clasificar de acuerdo con LGPGIR, ver Figura 1: Residuos Sólidos Urbanos. Son aquellos que se generan en casas habitación producto de las actividades antropogénicas (consumo de productos y su almacenamiento como envases, embalajes y empaques), y/o los materiales de actividades que se dan en la vía y lugares de actividades públicas como comercios, restaurantes, hoteles, entre otros (DOF, 2023).

- Residuos de Manejo Especial. Son aquellos que se generan en procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados residuos sólidos urbanos o peligrosos, o que son producidos en grandes volúmenes de residuos sólidos urbanos, ver Figura 2 (DOF, 2023).

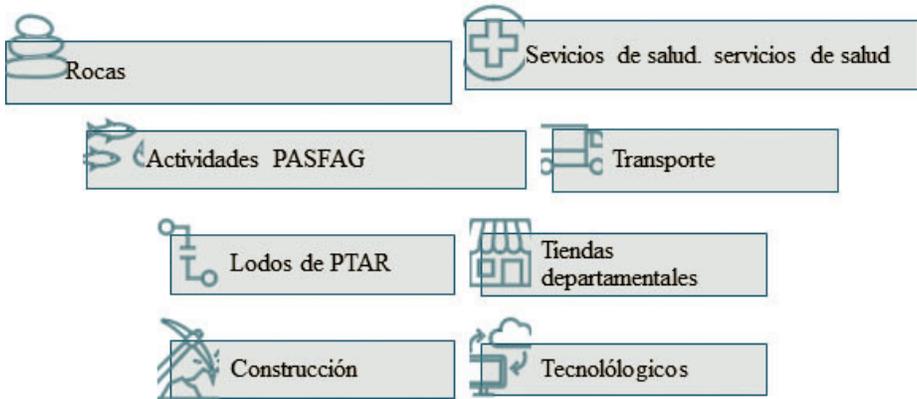


Figura 2. Clasificación de los residuos de manejo especial (DOF, 2023). PASFAG corresponden a pesquera, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas y ganaderas y PTAR corresponda a Planta de Tratamiento de Agua Residual.

- Residuos Peligrosos. Aquellos que poseen alguna de las características CRETIB que les confieren peligrosidad (corrosividad, C; reactividad, R; explosividad, E; toxicidad, T; inflamabilidad, I; o ser biológico-infecciosos, B), así como los envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados. Para los residuos peligrosos, la NOM-052-SEMARNAT-2005 establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos (DOF, 2005).

Generación de residuos

A nivel mundial se generan 2,010 millones de toneladas anuales de residuos municipales, que considera alimentos no consumidos, electrodomésticos, ropa y envases de plástico, de los cuales de recolecta un 84% y se dispone en sitio controlado un 61% y al menos el 33% -en términos muy conservadores- no se gestiona de forma segura para el medio ambiente. La media mundial de residuos generados por persona y día es de 0.74 kilogramos, pero oscila entre 0.11 y 4.54 kilogramos. Para el año 2050 se estima que la generación de residuos se incrementará a un 56% hasta alcanzar los 3,400 millones de toneladas, esto si no se toman medidas urgentes (WBG, 2024).

218

Existe una relación entre la generación de residuos y el nivel de ingresos, se estima que la generación diaria de residuos per cápita en los países desarrollados aumente un 19% de aquí a 2050, en comparación con los países de en desarrollo y subdesarrollados, donde se espera que aumente aproximadamente un 40% o más. De acuerdo con el Banco Mundial (UNEP, 2024) el costo mundial para la gestión de residuos se estimó en 252,000 millones de dólares y si se consideran los impactos directos e indirectos que provoca la gestión inadecuada de los residuos, el costo se incrementa a 361,000 millones de dólares. Para el 2050, el costo se podría duplicar, si no se toman medidas urgentes en relación con la gestión adecuada de residuos (UNEP, 2024).

La región de Asia Oriental y el Pacífico genera la mayor parte de los residuos del mundo, con un 23%, y la región de Oriente Medio y Norte de África es la que menos produce en términos absolutos, con un 6%. Sin embargo, las regiones de más rápido crecimiento son África Subsahariana, Asia Meridional y Oriente Medio y Norte de África, donde, para 2050, se espera que la generación total de residuos se triplique, duplique y duplique, respectivamente. En estas regiones, más de la mitad de los residuos se disponen en tiraderos a cielo abierto no controlados, generando impactos graves en el medio ambiente, la salud y la prosperidad, lo que pone a la gestión de residuos como un tema prioritario (UNEP, 2024).

Los objetivos de desarrollo sostenibles son una oportunidad para que la sociedad y los sectores productivos trabajen para mejorar la calidad de vida y erradicar la pobreza, a través de un desarrollo económico que incorpore la educación, sanidad, protección social y mejores oportunidades de empleo, haciendo frente al cambio climático y la protección del medio

ambiente. Los objetivos de desarrollo sostenible enfocados en la gestión de residuos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. ODS en materia de residuos sólidos (UNEP, 2024)

	En el esquema de manejo integral de residuos, las etapas de recolección, separación y recuperación de residuos, los trabajadores de la economía informal que no tienen protección sanitaria ni social son vulnerables a la explotación y sólo se les paga por el valor material de los materiales que recogen. Reto: desarrollar políticas municipales de gestión de residuos más eficaces para abordar tanto la pobreza como la contaminación.
	El hambre puede reducirse aprovechando el desperdicio de alimentos y redistribuir el exceso de comida. Además, es posible transformar los residuos alimentarios no aprovechados en compost y con ello contribuir a la restauración de suelos agrícolas agotados.
	Las comunidades sin servicios municipales adecuados de gestión de residuos recurren a la disposición y a la quema de estos a cielo abierto en sitios no controlados , que tienen consecuencias negativas para la salud , especialmente mujeres y niños.
	Los cursos de gestión de residuos en educación media superior y superior son mínimos, lo que resulta en una falta de capacidad técnica profesional y una escasez de trabajadores con las habilidades y conocimientos adecuados.
	La experiencia de las personas con los residuos y su gestión está diferenciada por sexos : por ejemplo, las actividades domésticas de compra y generación de residuos, y niveles.
	El manejo inadecuado de los residuos y su descomposición contaminan las fuentes de agua dulce y las cadenas alimentarias.
	Los residuos alimentarios no aprovechados en alimentación pueden utilizarse para producir biogás , que podría utilizarse para hacer frente a la pobreza energética, incluso en comunidades sin conexión a la red eléctrica.
	El sector de la gestión y el reciclaje de residuos podría ser un eje estratégico para mejorar la eficiencia global de los recursos, desvincular el crecimiento económico de la degradación medioambiental y ofrecer puestos laborales decentes.
	Los sistemas descentralizados de gestión de residuos pueden atraer inversión privada, fomentando la innovación, el espíritu empresarial, desarrollo tecnológico nacional, una mayor eficiencia y mayores oportunidades de empleo, y reducir los riesgos financieros para gobiernos y municipios.

 <p>10 REDUCCIÓN DE LAS DESIGUALDADES</p>	<p>Las desigualdades intergeneracionales deben abordarse mediante el desarrollo de sistemas de gestión de residuos y recursos, transitando a una economía circular.</p>
 <p>11 CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES</p>	<p>La gestión de residuos sólidos es un servicio básico sin el cual la calidad del aire, agua y suelo, y las condiciones de vida se degradan, impactando la salud y el descontento social. Para el avance hacia ciudades y comunidades inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles, es necesario garantizar el acceso universal a los servicios municipales de gestión de residuos.</p>
 <p>12 PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES</p>	<p>La producción y consumo tienen un impacto directo en los municipios. Por ello se deben implementar estrategias para reducir los residuos y prevenir la contaminación por parte de empresas, gobiernos y ciudadanos.</p>
 <p>13 ACCIÓN POR EL CLIMA</p>	<p>Los residuos mal gestionados generan emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático, sobre todo metano, así como carbono negro y otras emisiones derivadas de la práctica de la quema de residuos a cielo abierto.</p>
 <p>14 VIDA SUBMARINA</p>	<p>Los residuos llegan a los mares, por lo que es importante desarrollar estrategias urgentes sobre todo en los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo, que se enfrentan al problema de gestión de residuos.</p>
 <p>15 VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES</p>	<p>Los ecosistemas terrestres son el principal sumidero de residuos, mientras que las comunidades rurales se enfrentan a complejos retos de gestión de residuos que, si no se atienden pueden afectar significativamente a los ecosistemas y a los medios de vida dependientes.</p>
 <p>16 PAZ, JUSTICIA E INSTITUCIONES SÓLIDAS</p>	<p>La gestión de residuos debe considerar una mayor cooperación internacional para crear capacidad nacional para la gestión segura de los residuos peligrosos y prevenir su tráfico ilegal.</p>
 <p>17 ALIANZAS PARA LOGRAR LOS OBJETIVOS</p>	<p>Las inversiones actuales en gestión de residuos son insuficientes. En el futuro serán necesarias inversiones mucho mayores para hacer frente a la creciente generación de residuos y a la acumulación de residuos heredados.</p>

Generación de residuos en México

La generación de residuos está relacionada con la urbanización, el incremento del poder adquisitivo conlleva a hábitos de alto consumo de bienes y servicios, generando un mayor volumen de residuos. Mientras que, en las comunidades pequeñas o rurales, los habitantes basan principalmente su consumo local que carecen de materiales que finalicen como residuos.

En México, la generación de residuos sólidos por habitante es de 1.2 kg en promedio, de esta cantidad, los residuos orgánicos constituyen la mayor parte, seguidos por los reciclables y los inertes (Gholian-Jouybari y col., 2024).

En México, el Estado de México (6.98 millones de ton que representa un 15.7% del total nacional), Ciudad de México (3.98 millones de ton; 9%), Jalisco (3.2 millones de ton; 7.1%), y Veracruz (2.4 millones de ton; 5.3) son los principales generadores de residuos. Mientras que, Colima (241,955 ton; 0.5%), Baja California Sur (301,640 ton; 0.7%), Tlaxcala (301,759 ton; 0.7%) y Campeche (313,317 ton; 0.7%) son los estados que generan menor cantidad de residuos (SEMARNAT, 2017).

La composición de los residuos en México es principalmente orgánica con un 51.6 %, seguido de papel, cartón y productos afines (14.2%), plásticos (11.0%) y vidrio (6.1%), y el resto de estos residuos son constituidos por aluminio, metales ferrosos y no ferrosos, y textiles (SEMARNAT, 2017).

Para el manejo de residuos en México destacan las etapas de recolección, con una cantidad de 38 millones de toneladas (hasta 2016); el reciclaje de PET (22.2%, con 17,044 kg/d), seguido por el papel, cartón y productos de papel (28.3%, 21,746 kg/d) y plásticos (10.3%, 7,880 kg/d); y disposición final en rellenos sanitarios, con los que cuentan las entidades federativas (SEMARNAT, 2017).

En México, es una realidad, las actividades antropogénicas y los sectores productivos generan grandes cantidades de residuos, que dadas sus diferentes características y tasa de generación constituye un gran reto para su gestión y el manejo inadecuado tiene impactos graves en la calidad del medio ambiente, ver Figura 3.

Las actividades industriales, agrícolas, ganaderas y urbanas y la gestión inadecuada de los residuos (sólidos, líquidos y/o gases) contribuyen substancialmente a la contaminación de aire, agua y suelos, ver Figura 3. Los contaminantes procedentes de la descomposición natural de residuos por el manejo inadecuado, la quema de combustibles fósiles y el uso de sustancias químicas volátiles han debilitado la capa de ozono, que protege a los seres vivos de las radiaciones ultravioletas del Sol, y han provocado el calentamiento global (Yin y col., 2024). Aunado a lo anterior, la quema clandestina de residuos en sitios a cielo abierto y no controlados, constituye uno de los grandes retos en México. La contaminación del agua y del suelo por el manejo inadecuado puede traer consigo la transmisión de

enfermedades y la proliferación de fauna nociva, trayendo consigo modificaciones en los hábitats de las especies y con ello la pérdida y deterioro de ecosistemas (Mor y col., 2023; Dahunsi, 2025).

La gestión inadecuada de residuos genera una fuerte presión sobre el ambiente y la gran cantidad de residuos que se generan han traído a discusión sobre la fabricación y el consumo sostenible, específicamente cuando se aborda el uso de los recursos naturales y energéticos necesarios para producir todos los materiales y bienes que terminarán por convertirse en residuos. De esta manera, la gestión integral de los residuos, además de procurar reducir su generación y conseguir su adecuada disposición final, también puede dar como resultado colateral la reducción, tanto de la extracción de recursos (evitando su agotamiento), como de la energía y el agua que se utilizan para producirlos, así como la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero.

222



Figura 3. Impactos en el medio ambiente por el manejo inadecuado de residuos.

Marco regulatorio en México

La regulación para la gestión de residuos es clave para garantizar el manejo adecuado y con ello reducir y minimizar los impactos ambientales y proteger la salud de la población. En México, la gestión de residuos comenzó en 1891, estableciendo en primer código sanitario, seguido por otras iniciativas, enlistadas en la Figura 4.

Regulación en materia de residuos	1891 Primer Código Sanitario por el Consejo de Salubridad
	1960 Diseño, construcción y operación del primer Relleno Sanitario
	1970 Interes Nacional por Cuestiones Ambientales
	1976 Creación de la Subsecretaría de Mejoramiento Ambiental
	1982 Inicia los proyectos relacionados a la normatividad en materia de Residuos
	1983 Inicia el programa de RS100 para vertederos en ciudades de (100,000 habitantes)
	1994 Creación de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

223

Figura 4. Línea de tiempo del registro de regulación en materia de residuos (Olivo Escudero y col., 2024; PAO, 2024).

Hoy en día, el marco regulatorio contempla leyes, normas y políticas públicas (Figura 5), cuyos objetivos se comprenden en tres puntos, ver Figura 6, los cuales se fundamentan en la protección del medio ambiente y de la salud de la población, así como el aprovechamiento, reciclaje y valorización de los residuos para el fomento de modelos económicos circulares, bajo el marco regulatorio existente.

En México, el marco regulatorio se fundamenta en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), e instrumentos de Política de Prevención y gestión Integral de residuos como el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (PNPGIR) y el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral

de los Residuos de Manejo Especial (PNPGIRME), con base en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (DBGIR), que es competencia de la federación. El marco regulatorio e instrumentos están orientados a la transición sostenible en la gestión de residuos en México (SEMARNAT, 2022).

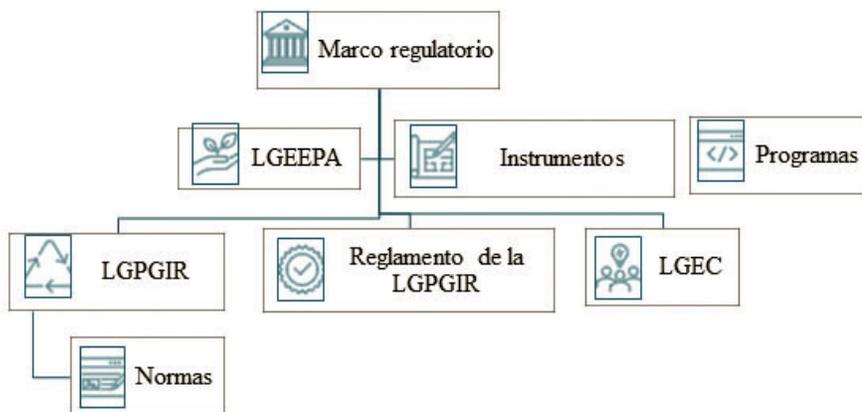


Figura 5. Marco regulatorio para la gestión de residuos.

Objetivos

Proteger al medio ambiente a través de la reducción de la fuente, reciclaje, reutilización y disposición adecuada.

Promover modelos de economía circular por el reciclaje y la reutilización de materiales secundarios.

Cumplir las normas internacionales y objetivos de desarrollo sostenible.

Figura 6. Objetivos del marco regulatorio en residuos.

Leyes, normas e instrumentos

Ley General de Equilibrio Ecológico y protección al Ambiente (LGEPA) tiene como objetivos garantizar el derecho de las personas a medio ambiente sano; protección, restauración y mejoramiento de ambiente; la protección y preservación de la biodiversidad; aprovechamiento sostenible de recursos naturales; prevención y control de la contaminación

de aire, suelo y agua y garantizar la participación de las personas para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente (DOF, 2016).

Los objetivos de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) de son garantizar el derecho a un medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación (DOF, 2023).

Reglamento a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos busca reglamentar la LGPGIR, se rige en territorio nacional, su aplicación concierne al Ejecutivo Federal y es conducida por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (DOF, 2014).

Finalmente, la Ley General de Economía Circular (LGEC) tiene como objetivos reducir el impacto de las actividades económicas y el consumo de materia primas vírgenes, promoviendo la reducción, recuperación, reciclaje y reutilización de residuos y rediseño de productos, valorar los residuos y estimular la creación de modelos económicos circulares, en sectores productivos formales e informales; y favorecer la transformación hacia ciudades y comunidades sostenibles.

La normatividad en materia de gestión de residuos en México está constituida por normas oficiales mexicanas y normas mexicanas, relacionadas con la protección al ambiente. La norma oficial mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 establece las especificaciones para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, y la NOM-098-SEMARNAT-2002 proporciona las de operación y límites de emisión de contaminantes en Incineradores. Las normas mexicanas NMX-AA-015-1985, NMX-AA-016-1984, NMX-AA-018-1985, NMX-AA-019-1985, NMX-AA-021-1985, NMX-AA-022-1985, NMX-AA-024-1984, NMX-AA-025-1984, NMX-AA-031-1976, NMX-AA-032-1976, NMX-AA-033-1985, NMX-AA-052-1985, NMX-AA-061-1985, NMX-AA-067-1985, NMX-AA-068-1986, NMX-AA-080-1986, NMX-AA-091-1987, NMX-AA-092-1984 y NMX-AA-094-1985 están enfocadas en la protección del ambiente a través de la caracterización del suelo y de los residuos.

El marco regulatorio a través de la normatividad y las leyes (Figura 5) regulan la clasificación de los residuos (RSU, Manejo especial y Peligro-

tos), las responsabilidades de los generadores de residuos, y las obligaciones de los gestores de residuos: regulaciones a los residuos peligrosos dadas sus características que les confieren; regulación de la disposición final, que está relacionado a cómo y dónde se disponen los residuos no susceptibles a ser valorizados; y fomento a la minimización, aprovechamiento, valorización y reciclaje de los residuos (DOF, 2021).

Gestión de residuos

La gestión de residuos sólidos es un enfoque estratégico para la gestión sostenible de los residuos sólidos considerando aspectos ambientales, técnicos, sociales, económicos, políticos y administrativos (ver Figura 8) que contemplan desde la reducción desde la fuente, la generación, segregación, transferencia, clasificación, tratamiento, recuperación y disposición final de forma integrada, para transitar a modelos económicos circulares y a modos de vida sostenibles.

226



Figura 8. Aspectos relevantes en la gestión de residuos sólidos.

La gestión de residuos sólidos tiene beneficios importantes entre los que destaca lugares más limpios y seguros, optimización y ahorro en el uso de los recursos, ahorro en costes de gestión de residuos gracias a la reducción de los niveles de residuos finales para su disposición final, mejores oportunidades de negocio y crecimiento económico y apropiación local y responsabilidades / participación en el manejo de residuos sólidos.

En la gestión de residuos sólidos, los componentes claves está relacionados con la reducción desde la fuente, reutilización y reciclaje, compostaje, manejo integral de residuos peligrosos y la recuperación de materiales valiosos, ver Figura 9 (Begho y Fadare, 2023).

- **Reducción de residuos desde la fuente.** Este componente está relacionado con la evaluación y reevaluación de los procesos para identificar oportunidades de generar menos residuos, así como fomentar en la comunidad modos de vidas sostenibles, adoptando prácticas eficientes y reduciendo el exceso de envases.
- **Reciclaje y reutilización.** El reciclaje es la piedra angular y consiste en recolectar y procesar materiales y transformarlos en nuevos productos.
- **Compostaje.** La transformación de la fracción orgánica presente en los residuos, a través de un proceso de digestión aerobia, en compost rico en nutrientes, que puede utilizarse para enriquecer el suelo y promover la agricultura sostenible.
- **Gestión de residuos peligrosos:** Para las industrias que generan residuos peligrosos, una gestión y eliminación, a través de la incineración con recuperación de energía o confinamiento, son claves para garantizar la seguridad medioambiental y el cumplimiento de la normativa.
- **Recuperación de recursos y prácticas de economía circular:** La recuperación de materiales valiosos y su incorporación a procesos productivos como materiales secundarios se alinea con la transición de una economía lineal («tomar-hacer-eliminar») a una economía circular, en la que los recursos se conservan y reutilizan de forma eficiente.

ESTRATEGIAS PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS
EN LAS COMUNIDADES PURÉPECHAS



Figura 9. Componentes de la gestión de residuos sólidos.

228

En la gestión de los residuos sólidos, la reducción desde la fuente es uno de los componentes clave y que precede al manejo integral de residuos. En este componente los componentes claves son (ver Figura 10): (i) la comunidad, donde el pilar fundamental es la educación ambiental para la sensibilización y concientización de la comunidad entorno a la importancia del medio ambiente, empleando enfoques de eco-pedagogía, pedagogía crítica, justicia ambiental y cosmovisión para su reconocimiento como parte de medio ambiente; y (ii) los proceso productivos que transiten al desarrollo de productos más eficientes y considerando el ciclo de vida de los productos y generando incentivos en las empresas para la optimización de recursos y la migración a tecnologías limpias, eficaces y seguras.

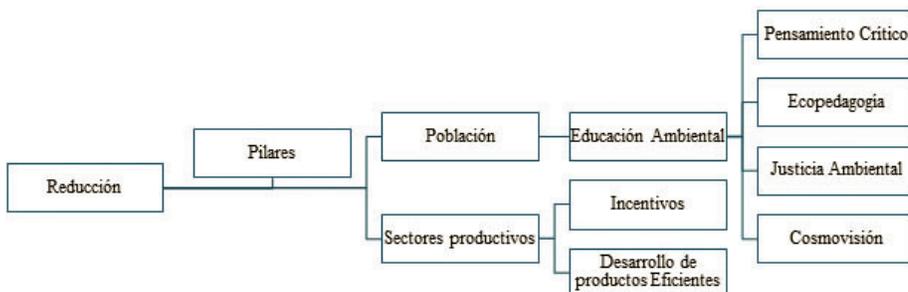


Figura 10. Pilares en la reducción en generación de residuos.

Manejo integral de residuos sólidos urbanos

El manejo integral de residuos sólidos involucra una serie de etapas consecutivas que considera el flujo de residuos, métodos de recolección y procesamiento, ver Figura 11, de lo cual derivan beneficios ambientales, optimización económica y aceptación social en un sistema de manejo práctico para una región en particular.



Figura 11. Manejo integral de residuos sólidos.

- **Reúso:** Los materiales cotidianos que usamos y luego tiramos, como envases de productos, muebles, ropa, botellas, restos de comida, periódicos, electrodomésticos, pintura y pilas pueden depositados en centros de acopio y ser susceptibles a: (i) donar o vender/comprar artículos de segunda mano, (ii) compartir, prestar o alquilar los artículos, (iii) utilizar productos duraderos en lugar de desechables, (iv) reusar los materiales de embalaje, (v) utilizar bolsas reutilizables al hacer la compra y (vi) recuperar materiales valiosos para reutilizarlos en nuevos proyectos (EPA, 2016; Sepúlveda Olea y col., 2024).
- **Recolección:** Esta etapa del manejo integral de residuos sólidos consiste en la recogida de los residuos de los lugares de generación, y transportados a la estación de transferencia para las siguientes etapas del manejo integral de residuos. Los dos tipos de recolección

que se emplean son: la *recolección general* sin que este presente la clasificación ni se consideran las características de los residuos, y *recolección selectiva* en la cual se consideran características particulares para ser recuperados y reciclados. En México se recolectan 83.93% de los residuos urbanos generados (SEMARNAT, 2017).

- **Recuperación:** La recuperación de residuos sólidos consiste en extraer y reutilizar componentes que están presentes en los residuos, sin la necesidad de procesarlos previamente. Algunos ejemplos son la digestión aerobia o anaerobia para la producción de abono o biogás, respectivamente, y la recuperación de componentes metálicos, poliméricos, vidrio, entre otros, de residuos optoelectrónicos, electrónicos, eléctricos y electrodomésticos.
- **Reciclaje:** Esta etapa consiste en procesar y transformar los materiales que componen los residuos sólidos urbanos en nuevos productos. Esta etapa ayuda a reducir la demanda de recursos naturales y a disminuir la cantidad de residuos destinados a la disposición final. Para el procesamiento y la transformación de los materiales se emplean procesos mecánicos, físicos, químicos, térmicos y biológicos. Los materiales reciclados se transforman en materiales secundarios que pueden ser reutilizados en proceso productivos (Memon y col., 2010).
- **Reutilizar:** En esta etapa los materiales secundarios se pueden integrar a los procesos productivos para su transformación en nuevos productos que tendrán nuevas características y usos particulares. En esta etapa existen grandes retos como ciclos de mercado, demanda, economía industrial, competencia con productos vírgenes, dificultades en el reciclaje, cambio en los procesos por el uso de materiales reciclados, desconfianza en los consumidores y precio, Figura 12 (Memon y col., 2010).



Figura 12. Retos para uso de materiales secundarios en procesos productivos.

- **Disposición final:** Los residuos sólidos con disposición final inadecuado agrava los impactos socioambientales, degradando el suelo, contaminando el aire. Además de agravar las condiciones de insalubridad de los centros urbanos, ver Figura 3. Por ello, aquellos residuos que no pueden ser aprovechados y/o reciclados deben someterse a un proceso de disposición final adecuado, este puede incluir el tratamiento térmico con recuperación de energía significativa y con ello diversificar la matriz energética, a través de procesos tecnológicos, actualmente disponibles y económicamente viables (Memon y col. 2010; Batista y col. 2021).

Estrategia para la gestión de residuos sólidos en comunidades

Los sistemas de gestión de residuos sólidos son diferentes en cada país, ya que están influido por factores sociales, económicos, culturales, psicológicos, educativos, tecnológicos, políticos (Batista y col. 2021). Los sistemas de manejo integral de residuos sólidos contemplan separar, almacenar, recolectar, transportar, procesar, recuperar y eliminar los residuos sólidos, lo cual requiere visiones y estrategias multidisciplinares, donde la participación de las autoridades, la comunidad y los miembros de los municipios es crucial para el éxito.

En México, la gestión de residuos sólidos le compete a la SEMARNAT (ver Sección marco regulatorio) y el manejo integral está constituido por la recolección, transporte, reciclaje manual (a través de la pepena) y disposición final en rellenos sanitarios controlados, en algunos casos con recuperación de energía (biogás), bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004). México aún tiene grandes retos en cada una de las etapas, los materiales recuperados y reciclados representan un 9.6 % del volumen de residuos generado, en 2012 (SEMARNAT, 2017).

En comunidades rurales, la gestión de residuos resulta aún más complejo debido a la falta de infraestructura y tecnología. Algunos casos que se han identificado son:

- En las comunidades rurales, las viviendas están dispersada, en los múltiples casos la distancia entre las viviendas es considerable, esto implica que los costos de recolección y transporte se eleven y que por lo tanto no se realice. Ante esto, los residuos son quemados a cielo abierto, o bien vertidos en zonas forestales, mantos acuíferos

superficiales o abandonados en las periferias de la comunidad. Esto pone en riesgo la salud de la comunidad y de los ecosistemas, y la calidad de los recursos hídricos, del suelo y del aire.

- La separación de los materiales susceptibles a reciclaje se lleva a cabo por el incentivo económico que representa para el recolector. Sin embargo, el aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos para compostaje no se implementa con frecuencia.
- Con frecuencia la disposición final de residuos es la quema a cielo abierto.

El bienestar y desarrollo de la comunidad sólo puede ser sostenible si los residuos generados son gestionados adecuadamente, y el pilar fundamental de la gestión sostenible de residuos es inclusión social. En este contexto, en la gestión de residuos, la educación ambiental es crucial para la concientización, sensibilización y reconocimiento de la importancia del cuidado y protección del medio ambiente, que contribuirá a la inclusión y participación de la comunidad.

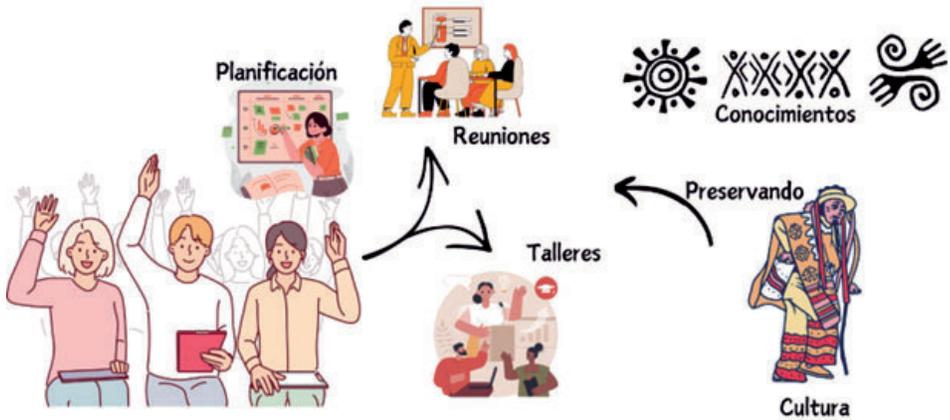
En la gestión de residuos en comunidades indígenas rurales no sólo se debe considerar la participación e inclusión de la comunidad, sino también integrar las prácticas tradiciones con las prácticas modernas y promover modos de vida sostenibles. Para ellos existen algunos aspectos a considerar:

- **Diagnóstico de las prácticas actuales.** Para establecer estrategias para la gestión de residuos, lo primero que se debe analizar es qué se hace en la comunidad para el manejo de residuos y qué prácticas se realizan, Figura 13 (Herrera-Díaz y col., 2025). El diagnóstico de las prácticas actuales consiste en cuantificar la cantidad de residuos que se generan y los tipos de residuos, así como las actividades que realiza la comunidad para la eliminación de los residuos. En esta etapa es importante involucrar a la comunidad, ya sea en la cuantificación o través de un foro comunitarios para compartir los resultados obtenidos del diagnóstico. Esto permite que la comunidad tome conciencia sobre los retos que enfrenta en relación con la generación y manejo de residuos sólidos o incluso que identifique la problemática.



Figura 13. Diagnóstico de residuos sólidos en la comunidad.

- **Participación y compromiso de la comunidad.** En la gestión de residuos sólidos, la participación y compromiso de la comunidad son claves para la formulación, desarrollo, implementación y seguimiento de las actividades que den soluciones eficaces y sostenibles y que consideren sus valores locales. En este contexto, la formulación y planificación participativa de actividades cobra relevancia en toma de decisiones, mediante reuniones y talleres, los miembros de la comunidad pueden expresar sus preocupaciones, compartir ideas y colaborar en la propuesta de actividades. El enfoque participativo y colaborativo fomenta el sentido de pertenencia y la preservación e incorporación del conocimiento tradicional y cultura (ver Figura 14).



Participación y Compromiso Comunitario

Figura 14. Participación y compromiso comunitario en la gestión de residuos sólidos en la comunidad.

- **Educación.** La educación ambiental es uno de los pilares fundamentales para la gestión de residuos sólidos (Indrianti, 2016). La educación capacita a la comunidad para la toma de decisiones informadas para la reducción y el manejo integral de residuos. La educación permite que la comunidad adquiere conocimientos y desarrolla habilidades que permiten tener una comprensión más profunda de los retos en materia de residuos. A través de programas educativos se pueden atender las preocupaciones específicas de la comunidad y dar a conocer el impacto ambiental que traen consigo el manejo inadecuado de residuos. Mientras que, los talleres permiten los residuos, la importancia del reciclaje y las técnicas prácticas de compostaje y reducción de residuos (ver Figura 15). En la educación ambiental, la integración de tradiciones y cultura, a través de elementos culturales como la narración de cuentos y las prácticas tradicionales fomenta prácticas sostenibles dentro de los valores de la comunidad. La educación ambiental promueve la adopción de hábitos ecológicos, a través de la concientización, sensibilización y responsabilidad.



Figura 15. Rol de la educación ambiental en la gestión de residuos sólidos en la comunidad.

- **Reducción desde la fuente.** La etapa que antecede al manejo integral de residuos sólidos y las estrategias de reducción son claves para la minimización de residuos y promover modos de vida sostenible en la comunidad. La reducción de residuos desde la fuente contribuye a disminuir su impacto ambiental y fomenta las relaciones sociales y estrategias que promueven los valores de la comunidad (ver Figura 16).



Figura 16. Estrategias para la reducción de residuos en la comunidad.

- **Reciclaje y aprovechamiento de residuos orgánicos.** La recolección para el reciclaje de materiales de valor presente en los residuos sólidos, como: vidrio, PET, cartón y papel y materiales metálicos ferrosos y no ferrosos, es una práctica común en las comunidades, debido al incentivo económico que representa para el recolector. Sin embargo, para que el material pueda ser susceptible a transformación se deben implementar talleres, que no sólo

les permita la separación, selectiva o no, de residuos desde casa, sino que está práctica se desarrolle de la forma adecuada, conservando las propiedades del material recuperado y la limpieza, ya que son claves para que su transformación sea viable, ver Figura 15. La fracción orgánica contenida en los residuos sólidos, como restos de comida y desechos de jardín se pueden convertir en un abono rico en nutrientes que puede emplearse para mejorar el suelo de la comunidad. Los talleres y programas educativos (ver Figura 15) promueven la implementación de sistemas de reciclaje y compostaje, destacando mediante iniciativas educativas que destaquen los beneficios de estas etapas.

- **Disposición final de residuos sólidos.** Existen residuos que no se puede aprovechar ni reciclar de forma responsable con el medio ambiente. En este sentido, la comunidad deberá desarrollar una evaluación de la opción, que incluyen rellenos sanitarios controlados, incineradores o estaciones de transferencia, que es más pertinente para ellos. Los rellenos sanitarios controlados con captura de carbono es una de las opciones más comúnmente empleadas y puede ser eficaz si se gestionan los lixiviados y se construyen de acuerdo con la normatividad vigente, NOM-083-SEMARNAT-2003. Es importante la implementación de talleres de educación para la disposición de residuos peligrosos como materiales biológicos-infecciosos (Nematollahi y col., 2024), pilas, productos químicos y aparatos electrónicos (Kar y col., 2025) (Ver Figura 2).

238

Para la gestión de residuos sólidos en las comunidades, la participación de la población, líderes comunitarios, organizaciones y autoridades de gobierno, en la toma de decisiones y en la planificación, programación, desarrollo, seguimiento y retroalimentación, permite (i) la identificación y en la solución de problemas, (ii) la integración de conocimientos y tradiciones en las soluciones garantizando su pertinencia cultural, y (iii) desarrollo e implementación de proyectos comunitarios, construyendo comunidades más resilientes y cohesionadas para enfrentar los retos con herramientas.

En la implementación y desarrollo de sistemas de gestión de residuos sólidos, el monitoreo, evaluación y retroalimentación de las estrategias son componentes esenciales para asegurar su efectividad y sostenibilidad. Para el monitoreo de las estrategias, la definición de indicadores de

desempeño es crucial, algunos de los indicadores que se podrían emplear tasas de reciclaje, reducción de residuos generados y participación comunitaria en iniciativas de compostaje. En la gestión de residuos sólidos, los resultados cuantitativos (indicadores de desempeño) y aspectos cualitativos (recopilación de opiniones y experiencias) deben ser considerados en la evaluación de sistema, ya que dan información relevante sobre las prácticas adoptadas y los desafíos que enfrentaron, y que es crucial en el proceso de retroalimentación. En el proceso de retroalimentación se debe promover un enfoque colaborativo que involucra a los ciudadanos en la toma de decisiones, fortaleciendo su compromiso con la gestión sostenible de residuos.

Comentarios finales

En México, los principales retos en la gestión de residuos en materia son: implementación y fiscalización de las leyes (sanciones no suficientes y falta de infraestructura y recursos humanos), falta de conciencia de la población (educación y conciencia de la ciudadanía) y la vinculación entre los actores (gobierno, sectores productivos, organizaciones y ciudadanos). En las comunidades, la situación se agrava si consideramos la dispersión de viviendas, lo que implica altos costos en la recolección, transporte y disposición final, aunado a la ausencia de programas de educación ambiental y talleres en materia de manejo de residuos.

239

La estrategia propuesta para la gestión de residuos en comunidades integra las etapas claves para el manejo integral de residuos como lo son el aprovechamiento y valorización, así como la planificación, desarrollo, implementación y evaluación continua de programas de educación ambiental, cuyo propósito es la concientización, sensibilización y el reconocimiento de la importancia que tiene la protección del medio ambiente. La educación ambiental y la participación de la comunidad son los pilares fundamentales que puede sostener las estrategias implementadas para la gestión de residuos, así como fomentar y promover modos de vida sostenibles en la comunidad.

Es importante enfatizar que es imperante la gestión de residuos sólidos en las comunidades, para garantizar la salud de la población y de los ecosistemas, así como reducir la contaminación de los recursos hídricos, suelo y aire. La inclusión de la comunidad en la planeación, desarrollo, implementación y el monitoreo continuo de las estrategias en materia de

residuos preservará tradiciones culturales, la cohesión de la comunidad y la forma en que la comunidad interactúa con su entorno. Al promover prácticas de gestión de residuos, se busca no solo limpiar el entorno, sino también restaurar el vínculo entre la comunidad y su territorio.

Referencias

- Armijo, Carolina, Ojeda-Benitez, Sara, Quintanilla-Montoya, Ana. (2006). Waste management system in Mexico: history, state of the art and trends. *Journal of Solid Waste Technology and Management*. https://www.researchgate.net/publication/280881940_Waste_management_system_in_Mexico_history_state_of_the_art_and_trends
- Batista, M., Caiado, R. G. G., Quelhas, O. L. G., Lima, G. B. A., Leal Filho, W., Yparraguirre, I. T. R. (2021). A framework for sustainable and integrated municipal solid waste management: Barriers and critical factors to developing countries. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127516.
- 240 Begho, Toritseju, Fadare, Olusegun (2023). Does household food waste prevention and reduction depend on bundled motivation and food management practices? *Cleaner and Responsible Consumption*, 11, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2023.100142>.
- Diccionario de la lengua española. (2024) Real Academia Española. <https://dle.rae.es/residuo>
- DOF (2004) Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/2004#gsc.tab=0
- DOF (2005) Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/1055/SEMARNA/SEMARNA.htm>
- DOF (2014) Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/131723/17._REGLAMENTO_DE_LA_LEY_GENERAL_PARA_LA_PREVENCION_Y_GESTION_INTEGRAL_DE_LOS_RESIDUOS.pdf

- DOF (2016) Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Medio Ambiente <https://www.gob.mx/profepa/documentos/ley-general-del-equilibrio-ecologico-y-la-proteccion-al-ambiente-63043>
- DOF (2023) Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/131748/23._LEY_GENERAL_PARA_LA_PREVENCION_Y_GESTION_INTEGRAL_DE_LOS_RESIDUOS.pdf
- Dahunsi, Olatunde Samuel. (2025) Environmental impacts of waste generation and improper management. Woodhead Series in Bioenergy, 15-62, ISBN 9780443241291. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-24129-1.00003-X>.
- Guía para el manejo de residuos sólidos en ciudades (2010) Disponible en: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD000115.pdf>.
- Gholian-Jouybari, Fatemeh, Reza, Moein Khazaei, Saen, Farzipoor, Kia, Reza, Bonakdari, Hossein, Hajiaghaei-Keshteli, Mostafa, Ramezani, Mohammad (2024) Developing environmental, social and governance (ESG) strategies on evaluation of municipal waste disposal centers: A case of Mexico. *Chemosphere*, 364, 142961. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142961>.
- Herrera Diaz, Maria A., Lin, Yingqian, Burli, Pralhad H., Tasmin, Hossein, Hartley, Damon S., Thompson, Vicki S. (2025) Evaluation of sustainable waste management: An analysis of techno-economic and life cycle assessments of municipal solid waste sorting and decontamination, *Resources, Conservation and Recycling*, 212, 107970, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107970>.
- Indrianti, Nur (2016) Community-based Solid Waste Bank Model for Sustainable Education. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 224, 158-166, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.431>.
- Kar, Umut, Nili, Sheida, Mends, Emmanuel, Vahidi, Ehsan, Chu, Pengbo. (2025) A review and environmental impact analysis on the current state of froth flotation on recycling of e-wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 212, 107967. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107967>.
- Memon, M. A. (2010). Integrated solid waste management based on the 3R approach. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 12, 30-40.

- Mor, Suman, Ravindra, Khaiwal (2023) Municipal solid waste landfills in lower- and middle-income countries: Environmental impacts, challenges and sustainable management practices. *Process Safety and Environmental Protection*, 174, 510-530 <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.04.014>.
- Municipal Solid Waste (2016) EPA. U.S. Environmental Protection Agency <https://archive.epa.gov/>
- Nematollahi, Hossein, Ghasemzadeh, Reza, Tuysserkani, Maryam, Aziminezhad, Mohamadmahdi, Pazoki, Maryam. (2024) Comparative life cycle assessment of hospital waste management scenarios in Isfahan, Iran: Evaluating environmental impacts and strategies for improved healthcare sustainability. *Results in Engineering*, 24, 102912. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102912>.
- Olivo Escudero, Juan Carlos, Ortiz Aguirre, Andrea Doria, Perea Valerio, Margarita, Rodríguez Herrero, Pedro Hipólito (2024) La evolución de las regulaciones de los residuos sólidos urbanos en México: un abordaje interdisciplinario y de derecho comparado. *Actualidad Jurídica Ambiental*. <https://doi.org/10.56398/ajacieda.00367>
- PAO (2024) Evolución de la política en Materia de residuos. https://paot.org.mx/centro/libros/bases/capitulo_3.pdf
- SEMARNAT (2017) Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap7.html#tema0>
- SEMARNAT (2022) Prevención y gestión integral de los residuos. Programa orientado a los estados y municipios. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/prevencion-y-gestion-integral-de-los-residuos>
- Sepúlveda Olea, Felipe E., Burke, Ian T., Mohammad, Arif, Stewart, Douglas I. (2024) Reuse potential of municipal solid waste incinerator bottom ash as secondary aggregate: Material characteristics, persistent organic pollutant content and effects of pH and selected environmental lixivants on leaching behaviour. *Waste Management*, 187, 262-274. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.07.026>.
- UNEP (2024) Global Waste Management Outlook 2024. <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>
- World Bank Group. 2024 Trends in Solid Waste Management 2024 Disponible en https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html

Yin, Jun, Wang, Min, Yu, Xiaoqin, Wang, Meizhen, Zhang, , Yanfeng, Chen, Ting, Liu, Jianguo (2024) Carbon footprint impact of waste sorting on the municipal household waste treatment system: A community case study of Hangzhou. *Circular Economy*, 3(4),100114. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2024.100114>.

Educación ambiental y tecnologías sustentables.
Propuestas y prácticas para
un futuro socialmente responsable,
de Mario Morales Máximo y Luis Bernardo López Sosa,
editado por la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán,
se terminó de imprimir en febrero de 2025,
en los talleres gráficos de Editorial Cienpozuelos, S.A. de C.V.,
en Morelia, Michoacán, México.



Educación Ambiental y Tecnologías Sustentables: Propuestas y Prácticas para un Futuro Socialmente Responsable es un material interdisciplinario que compila diversos capítulos de investigación enfocados en temáticas clave relacionadas con la sostenibilidad y el cuidado del medio ambiente. Este compendio abarca áreas de gran relevancia, como la educación ambiental, el manejo del agua, la vivienda sustentable, las energías renovables, los biocombustibles y la bioenergía.

El material representa una colaboración entre especialistas de reconocidas instituciones educativas y de investigación de México, entre ellas la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y la Universidad Intercultural Indígena de Michoacán (UIIM). La riqueza de perspectivas y conocimientos compartidos refuerza el enfoque inclusivo y diverso del contenido, destacando soluciones innovadoras y prácticas sostenibles que abordan desafíos ambientales actuales.

El principal objetivo de esta obra es promover la protección del medio ambiente mediante la adopción de prácticas sustentables. Está diseñada para una amplia audiencia que incluye estudiantes, docentes, productores, miembros de comunidades rurales e indígenas, autoridades locales, investigadores, tecnólogos y emprendedores. Su propósito es inspirar y capacitar a diversos sectores de la sociedad para implementar cambios significativos hacia un futuro más sostenible.

Además, este material tiene un carácter divulgativo, orientado a garantizar el acceso universal al conocimiento. Busca convertirse en una herramienta valiosa para aquellos interesados en comprender y contribuir al desarrollo de soluciones ambientales inclusivas y responsables. Su enfoque está dirigido a fomentar la construcción de una realidad más segura, justa y sostenible, con una visión de largo plazo que integre la justicia social, la equidad y la protección de los recursos naturales.



**Universidad
Intercultural
Indígena
de Michoacán**



prodep
TIPO SUPERIOR
PROGRAMA PARA EL DESARROLLO PROFESIONAL
DOCENTE PARA EL EJERCICIO FISCAL 2023