

# Impluvium

Publicación digital de la Red del Agua UNAM  
Edición Especial, Diciembre 2022



## Diáspora Hídrica

Jóvenes Mexicanos Explorando  
las Fronteras del Conocimiento del Agua

20  
22



**MEDIO AMBIENTE**  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



## PRESENTACIÓN



México y el mundo experimentan retos complejos y de diversa índole para alcanzar la seguridad hídrica. A pesar de los importantes avances alcanzados por gobiernos, instituciones internacionales, empresas y organizaciones sociales, millones de personas continúan sin acceso a servicios básicos de agua potable y saneamiento o se encuentran en condiciones de riesgo provocado por la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos. Además, los ecosistemas asociados al agua se degradan a escalas que ponen en peligro la sustentabilidad del planeta.

Para hacer frente a estos desafíos, se requiere del trabajo colaborativo entre todos los sectores y del diálogo permanente entre las disciplinas del conocimiento bajo un espíritu de innovación. Desde su nacimiento en 2010, la Red del Agua UNAM se ha convertido en una plataforma para impulsar la docencia, la investigación y la difusión de la cultura sobre los recursos hídricos. Para alcanzar estos objetivos, hemos realizado alianzas estratégicas con los actores más relevantes a nivel nacional e internacional. Sin lugar a dudas, la colaboración con el Instituto de Ingeniería UNAM y el Instituto Mexicano de

Tecnología del Agua nos ha permitido avanzar hacia un entorno con mayor seguridad hídrica.

Los logros alcanzados por la Red del Agua UNAM son producto de sus miembros, principalmente de los jóvenes, pues son ellos quienes impulsan con mayor fuerza las innovaciones científicas, tecnológicas y sociales en la materia. Los jóvenes están en contacto con el conocimiento de vanguardia, se atreven a desafiar sus límites y experimentan con la ciencia de frontera. Sin embargo, es necesario fomentar su crecimiento, no solo a través de capacitaciones, sino mediante el reconocimiento de su papel como agentes de cambio.

La tercera edición de la “Diáspora Hídrica: jóvenes mexicanos explorando las fronteras del conocimiento del agua” se inscribe entre los múltiples proyectos que ha creado la Red para apoyar el talento de los jóvenes mexicanos. Continuamos, junto con Fundación UNAM, el Premio a la mejor tesis en recursos hídricos a nivel licenciatura y posgrado; nos hemos propuesto como política incorporar a jóvenes como ponentes en nuestros eventos

académicos; y hemos ofrecido un gran número de actividades académicas para su capacitación.

En los más de 20 números de nuestra publicación digital de divulgación científica Impluvium, hemos difundido ampliamente las investigaciones de los jóvenes, atendiendo en todo momento altos criterios de calidad. Por tanto, es con gran entusiasmo que decidimos dedicar nuevamente un número especial a los trabajos de los participantes de este tercer seminario virtual.

Estamos seguros que la información discutida por los jóvenes autores en los artículos contenidos en este número marcará la agenda de investigación hídrica en el mediano y largo plazos. 💧

DR. FERNANDO J. GONZÁLEZ VILLARREAL  
COORDINADOR TÉCNICO, RED DEL AGUA UNAM

M. EN C. JORGE ALBERTO ARRIAGA MEDINA  
COORDINADOR EJECUTIVO, RED DEL AGUA UNAM

## BIENVENIDA

Es posible afirmar que el mundo académico del 2050 será completamente diferente al de hoy; más aún, será virtualmente irreconocible respecto a aquel que existió hace treinta años. Las instituciones académicas requerirán la generación de una amplia base de capacidades y líderes altamente calificados que posean habilidades combinadas que resulten de un conocimiento científico multidisciplinario, con uso de la tecnología, la ingeniería y las matemáticas.

Dado que el agua es un elemento clave para el desarrollo social y económico de los países, esta evolución nos obliga a llevar a cabo una transformación en la manera en que enfrentamos y resolvemos los

problemas hídricos. Por otro lado, las nuevas generaciones de científicos e ingenieros constituyen el elemento central de la revolución que se observa en el conocimiento al incorporar tecnologías de la información que han modificado por completo la manera en la que vivimos. De esta manera, evolucionamos con el mundo, transformando nuestro quehacer hacia formas de pensamiento cada vez más interdisciplinarias.

Por esta razón, es necesario construir las vías que favorezcan la evolución de nuestros especialistas hacia un grupo aún más activo, moderno, abierto y vibrante. Necesitamos científicos e ingenieros dedi-

cados al agua que no solo desarrollen el mejor conocimiento disponible en el mundo, sino que tengan la capacidad para llevarlo de forma inmediata al corazón de las decisiones del gobierno para favorecer el desarrollo del país. Requerimos de un ecosistema de cooperación entre generaciones, campos de conocimiento e instituciones. Esto nos permitirá avanzar en la construcción de un México que favorezca el florecimiento del conocimiento y las ideas. Los jóvenes, el conocimiento y la innovación representan las rutas críticas para revivir el crecimiento sustentable de México y cerrar la brecha social y tecnológica.

Este fue el razonamiento que llevó a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales de México, a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), y de la mano del Instituto de Ingeniería y la Red del Agua UNAM, a realizar el 3<sup>er</sup> seminario virtual “Diáspora Hídrica: Jóvenes mexicanos explorando las fronteras del conocimiento del agua”. El evento, se celebró en un ambiente relajado y en acompañamiento de académicos de diversas instituciones nacionales dedicadas al agua y nos dio

la oportunidad de identificar las capacidades de la nueva generación de profesionistas que trabajan en la academia y la industria para dar solución a los problemas hídricos de nuestro tiempo. El objetivo fue generar un ecosistema de cooperación intergeneracional e interinstitucional.

Desde la perspectiva del IMTA, el futuro del agua en México, basado en los principios de la ética, la evidencia científica para sustentar la toma de decisiones y la transparencia en el manejo de la información hídrica, estará construido forzosamente sobre este diálogo intergeneracional. Las fortalezas de los académicos de mayor experiencia, en conjunto con jóvenes investigadores altamente calificados, harán de México un país vibrante para la generación de conocimiento de punta. Este evento nos permitió continuar esta tarea.


Las crisis económica y sanitaria globales que atravesamos el contexto de la pandemia de COVID-19, aunadas a las condiciones de cambio y competencia que se han puesto de manifiesto, demandan más que nunca de la investigación e innovación para mejorar las condiciones ambientales, econó-

micas, sociales y culturales del planeta. La escala y complejidad de los retos de este siglo requieren de un cambio de paradigma en la manera en la que promovemos el desarrollo y conducimos la economía, para enfocarlos hacia la búsqueda del bienestar con equidad y sustentabilidad.

Hoy más que nunca se requiere de la agilidad e ímpetu de las nuevas generaciones, y es tarea de todos conducir la transformación de México a través del uso sostenible del agua, con énfasis en el cierre de brechas de desigualdad, el desarrollo económico de todos y la conservación y recuperación del medio ambiente. 💧

**DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA**

DIRECTOR GENERAL DEL INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

The background of the page features a pattern of light gray water droplets of various sizes scattered across a white background. In the lower-left corner, there is a stylized globe composed of a wireframe of thin gray lines forming a spherical shape. The globe is partially filled with a grid of small, light green dots, which are more densely packed in some areas and sparser in others, creating a textured, digital effect.

Todas las opiniones vertidas en los trabajos aquí publicados son de responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente reflejan ni comprometen las opiniones del Comité Editorial de Impluvium o, por extensión, de las instituciones participantes en la edición de este número especial.

Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados, siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación.



**Impluvium** es una publicación de la Red del Agua UNAM; puede ser reproducida con fines no lucrativos, siempre y cuando no se mutila, se cite la fuente completa y su dirección electrónica. Los artículos compartidos son responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan necesariamente la opinión de la Red del Agua UNAM o de sus miembros.

Comité editorial:

**Dr. Fernando J. González Villarreal**

Coordinador Técnico Red del Agua UNAM

**M. en C. Jorge Alberto Arriaga Medina**

Coordinador Ejecutivo de la Red del Agua UNAM

**Mtra. Malinali Domínguez Mares**

Coordinadora de Asesores de la  
Dirección General del IMTA

**Mtra. Ana Gabriela Piedra Miranda**

Responsable de comunicación organizacional del  
Centro Regional de Seguridad Hídrica  
bajo los auspicios de UNESCO

Editores invitados:

**Mtro. Marco Antonio Sánchez Izquierdo**

Encargado de la Coordinación de Comunicación,  
Participación e Información del IMTA

Diseño gráfico y formación:

**Lic. Joel Santamaría García**

**Lic. Marie Claire Mendoza Muciño**

Publicación digital de la Red del Agua UNAM.

**Edición Especial, Edición Especial:**

**Tercera Diáspora Hídrica.**

Diciembre 2022

[www.agua.unam.mx/impluvium.html](http://www.agua.unam.mx/impluvium.html)

**Impluvium** es la publicación digital de divulgación de la Red del Agua UNAM, Año 8, Edición Especial, Diciembre 2022. Es una publicación trimestral editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, a través de la Red del Agua de la UNAM, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Instituto de Ingeniería, edificio 5, Col. Copilco, Del. Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, Tel. (55)56233600 ext.8745, <http://www.agua.unam.mx/impluvium.html>, [jarriagam@iingen.unam.mx](mailto:jarriagam@iingen.unam.mx). Editor responsable: M. en C. Jorge Alberto Arriaga Medina. Reserva de Derechos al uso Exclusivo: en trámite., ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Red del Agua UNAM, M. en C. Jorge Alberto Arriaga Medina, Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Instituto de Ingeniería, edificio 5, Col. Copilco, Del. Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México fecha de la última modificación, Diciembre 2022.



## CONTENIDO

### Presentación . . . . . 2

Dr. Fernando J. González Villarreal  
M. en C. Jorge Alberto Arriaga Medina

### Bienvenida . . . . . 4

Dr. Adrián Pedrozo Acuña



## ARTÍCULOS

### El análisis químico *in situ*: un primer acercamiento para describir un cuerpo de agua . . . . . 11

Cruz-Castañeda J, Heredia A, Negrón-Mendoza A,  
Ramos-Bernal S. y Silva-Aguilera R.

### El uso del ADN ambiental en el estudio de cuerpos de agua: Una propuesta para su implementación en México. . . . . 19

Ricardo Iván Cruz-Cano, Melanie Kolb, Luz Bretón-Deval,  
Alejandro Aldama Cervantes y Norma Berenice Cruz-Cano.

Pronóstico de sequías y estimación de impactos económicos en una cuenca hidrológica mediante *Machine Learning* . . . . . 27

Jesús Alberto Ceballos-Tavares y David Ortega-Gaucin.

Estrategias participativas multinivel para la gestión local del agua y del saneamiento en el territorio hidrosocial de la cuenca del Río Apatlaco . . . . . 35

Francisco Antonio Ramírez Rojas, Alejandra Peña García, Carolina Escobar Neira, Juana Amalia Salgado López y Natalia Chaves López.

Modelo para mejorar la gestión del suministro de agua potable para los habitantes de la Ciudad de México . . . . . 42

Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel.

Aumento en la producción de peroxidisulfato en un reactor dividido por una membrana de intercambio aniónico para degradar fenofibrato . . . . . 48

Rubí Daniela Casimiro Chávez, Petia Mijaylova Nacheva, Irma Robles Gutierrez, Ignacio Monje Ramírez y Pandiyan Thangarasu.



# EL ANÁLISIS QUÍMICO *IN SITU*: UN PRIMER ACERCAMIENTO PARA DESCRIBIR UN CUERPO DE AGUA

**CRUZ-CASTAÑEDA J, HEREDIA A,  
NEGRÓN-MENDOZA A, RAMOS-BERNAL S**  
INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES, UNAM

**SILVA-AGUILERA R**  
ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA, UNAM

**MELÉNDEZ-LÓPEZ A**  
INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES,  
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM



## Resumen

Los componentes químicos presentes en un cuerpo de agua nos permiten entender muchos aspectos, por ejemplo, su origen y su interacción con otros sistemas terrestres. El análisis químico es una herramienta que utilizamos para poder identificarlos y cuantificarlos. Muchas son las técnicas químicas que pueden utilizarse, sin embargo, la volumetría a microescala *in situ* es una técnica rápida, efectiva y de bajo costo que nos permite conocer aspectos

químicos cuantitativos que podemos utilizar para decidir si es necesario realizar posteriormente un análisis más especializado en los laboratorios. En este trabajo se presentan algunos resultados obtenidos de los análisis volumétricos complejométricos realizados *in situ* en una práctica de campo a los lagos Atexcac, Alchichica, La Preciosa y Quechulac, pertenecientes a la Cuenca Serdán-Oriental, México. Los análisis fueron realizados por estu-

diantes de cuarto semestre de la asignatura de Química Acuática de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra de la ENCIT, UNAM.

## Introducción

El análisis químico nos permite conocer la identidad química de un cuerpo de agua. Es amplia la gama de técnicas que se requieren para lograr este objetivo, entre las que se encuentran las técnicas volumétricas, espectroscópicas y cromatográficas. Generalmente, el análisis químico cuantitativo que se realiza para conocer la identidad química de un sistema acuático se hace en los laboratorios especializados, después de obtener las muestras. El análisis químico se hace siguiendo protocolos definidos y con la instrumentación química necesaria, por lo que, la mayoría de las veces los análisis son muy costosos. Por lo tanto, es necesario usar técnicas de análisis cuantitativo que sean confiables, económicas y rápidas para determinar así los aspectos físico-químicos generales de esos sistemas y decidir en ese momento si es necesario recolectar muestras para un análisis posterior en los laboratorios.

Una de las técnicas que se emplean usualmente es la volumetría o titulación, la cual es una técnica de análisis cuantitativo que nos permite conocer la concentración de una especie química en relación estequiométrica con estándares establecidos (Chang, 2010, p. 153). Dentro de las volumetrías más comunes se encuentra la ácido-base, redox y complejométrica. La volumetría complejométrica, por ejemplo, permite determinar la concentración de calcio y magnesio de una muestra de agua, es decir, conocer la dureza del agua, lo cual nos proporciona una medida de la calidad del agua para uso doméstico, industrial y agrícola (Harris, 2007, p. 8, 258-261). Esta técnica de análisis puede realizarse *in situ* debido a la fácil manipulación de los materiales con las que se realizan y así de manera rápida, efectiva y de bajo costo, se puede determinar la concentración de los iones de calcio y magnesio que dependen fundamentalmente por la composición geológica por la que atraviesa el agua. Habitualmente, la dureza del agua se determina mediante una valoración con un titulante, en este caso el ácido etilendiaminatetraacético (EDTA 0.01

mol L<sup>-1</sup>; pH 10) y un indicador colorido (purpurato de amonio), que es el que determina el punto de equivalencia de la valoración. El punto de equivalencia representa la cantidad estequiométrica de titulante que equivale a la sustancia que se está determinando, en este caso los cuatro cuerpos de agua visitados.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la clasificación de la dureza del agua en mg L<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1. La dureza del agua se expresa normalmente como cantidad equivalente de carbonato de calcio y según la OMS se clasifica desde ligeramente dura hasta muy dura.**

Dureza (mg L <sup>-1</sup> de CaCO <sub>3</sub> )	Tipos de agua según la OMS
0-60	Ligeramente dura
61-120	Moderadamente dura
121-180	Dura
	Muy dura

Se han propuesto metodologías de análisis volumétrico a microescala, donde se ven involucrados equilibrios químicos, empleando la mínima instrumentación, además, de fácil acceso y cantidades mínimas de reactivos y residuos (Baeza, 2003, p. 4-7). Los análisis a microescala fueron los que se elaboraron en la práctica de campo, debido a que los materiales y reactivos que se requieren son fácil transportarlos y manipularlos, por lo que, fue fácil realizarlos por estudiantes de cuarto semestre de la orientación de Ciencias Acuáticas de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra, UNAM. El objetivo general de la práctica de campo fue comprender la interacción de los cuerpos de agua y los demás elementos presentes en cada sitio auxiliándose del análisis químico cuantitativo *in situ* para así reflexionar acerca de la componente social y su relación con el agua, mientras que uno de los objetivos particulares fue determinar la concentración de calcio y magnesio, conociendo así la dureza del agua en los cuatro diferentes lagos visitados (véase Figura 1).

Figura 1. Se muestran los cuatro lagos Atexcac, Alchichica, La Preciosa y Quechulac, pertenecientes a la Cuenca Serdán-Oriental, México.

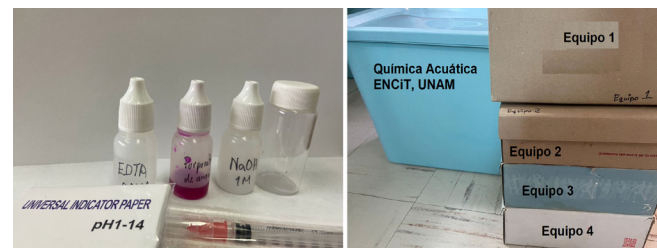


## Desarrollo experimental

Cuatro kits fueron asignados a cuatro equipos conformados por cuatro estudiantes. Entre otras cosas que se utilizarían para cumplir con otros objetivos, cada kit contenía: un recipiente de vidrio, una

jeringa de insulina, un gotero con EDTA ( $0.01 \text{ mol L}^{-1}$ ), un gotero con hidróxido de sodio ( $1 \text{ mol L}^{-1}$ ), un gotero con purpurato de amonio y papel indicador de pH (véase Figura 2).

Figura 2. Izquierda. Materiales necesarios para realizar una micro titulación complejométrica. Derecha. Los cuatro kits se colocaron en una caja de plástico que contenía otros materiales e instrumentos de medición (potenciómetro, densímetro, conductímetro, electrodo de oxígeno, colorímetro portátil y recipientes adecuados para tomar muestras líquidas y sólidas para posterior análisis en el laboratorio).



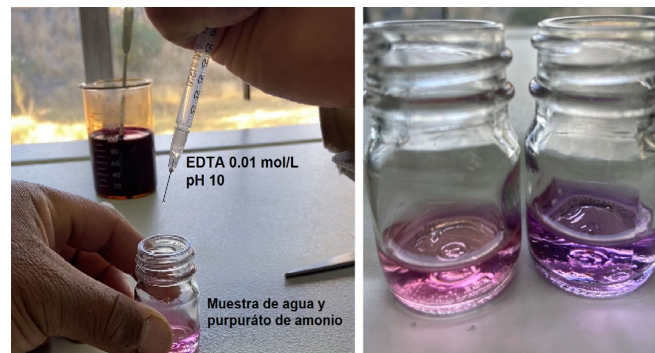
El desarrollo experimental consistió en colocar en un recipiente de vidrio, 1 mL de agua del lago, 1 gota de NaOH para ajustar el pH mayor a 10 y 2

gotas de purpurato de amonio, mezcla de color rosa (véase Figura 3). Por otro lado, se llenó la jeringa de insulina con la disolución estándar de EDTA y se le adicionó gota a gota el EDTA a la muestra de agua del recipiente de vidrio hasta observar un cambio de coloración (de rosa a morado, véase Figura 3). Se registró el volumen consumido en la titulación y se realizó el procedimiento matemático necesario para determinar la dureza del agua.

## Resultados

De los resultados obtenidos para cada análisis se determinó que los cuatro lagos tienen diferentes características fisicoquímicas que pudieron ser analizadas y discutidas *in situ* (Véase Figura 4). Se observó que los cuatro cuerpos de agua tienen diferentes valores de alcalinidad, densidades, concentraciones de clorofilas, conductividad eléctrica y dureza del agua (véase Tabla 2).

**Figura 3.** Izquierda. En la jeringa se coloca la disolución de EDTA  $0.01 \text{ mol L}^{-1}$  y en el recipiente de vidrio se coloca la muestra de agua con concentración de calcio y magnesio desconocida y dos gotas de purpurato de amonio. Derecha. En el recipiente de vidrio del lado izquierdo se muestra el sistema antes de agregar EDTA y al lado derecho se muestra la coloración que adquiere el sistema cuando se llega al punto de equivalencia.



**Figura 4. Análisis químico *in situ* realizado en Atexcac por estudiantes de cuarto semestre de la Orientación en Ciencias Acuáticas de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra de la ENCIT-UNAM.**



Los resultados mostrados en la Tabla 2 nos permitieron comprender que los cuatro cuerpos de agua analizados son sistemas conformados por piezas que se encuentran interrelacionadas, que inte-

**Tabla 2. Se muestra la dureza de los cuatro lagos analizados por las y los estudiantes.**

Lago	Tipos de agua según la OMS
Quechulac	Ligeramente dura
La preciosa	Moderadamente dura
Atexcac	Dura
Alchichica	Muy dura

ractúan entre sí y se auto sostienen. Por lo tanto, el análisis químico *in situ* demostró ser:

1. Una excelente estrategia didáctica para mostrar a las y los estudiantes *la importancia del análisis químico cuantitativo en la Química Acuática.*
2. Una estrategia que muestra la importancia del análisis a microescala *in situ* como primer acercamiento a un cuerpo de agua.
3. Una experiencia que nos permitió comprender *la interacción de los cuerpos de agua y los*



*demás elementos presentes en cada sitio al obtener resultados diferentes en cada uno de los lagos.*

4. Una experiencia que nos permitió reflexionar acerca de la componente social y su relación con el agua, tanto en la actualidad como en el pasado.

## Conclusiones

Es cierto que para estudiar un cuerpo de agua se requiere hacer análisis químico cuantitativo a nivel ultra traza como el que hacemos en los laboratorios de muchas instituciones. Sin embargo, es igual de necesario implementar experiencias de análisis in situ rápidas, efectivas y de bajo costo que nos permita tener un primer acercamiento analítico a los problemas que atañen a los cuerpos de agua. Cualquier herramienta que nos permita estudiar los componentes químicos presentes en un cuerpo de agua debe ser utilizada desde la trans, multi e interdisciplinariedad para percibir y determinar el alcance y la magnitud de los cambios generados, y

prevenir en lo posible sus efectos o revertir sus consecuencias.

## Agradecimientos

Se agradece a la Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra y al Laboratorio de Evolución Química del Departamento de Química de Radiaciones y Radioquímica del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM por todas las facilidades proporcionadas para la realización de la práctica de campo; así como a nuestras queridas y queridos estudiantes de la primera generación de la Orientación de Ciencias Acuáticas de la Licenciatura en Ciencias de la Tierra de la ENCIT-UNAM. 💧

## Bibliografía

Baeza, A. (2003). Microbureta a Microescala total para titulometría. *Revista Chilena de Educación Científica*, Número 1-2.

Chang, R. (2010). *Química*. 10ª. Edición, McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V., México.

Harris, D. C. (2007). *Análisis Químico Cuantitativo* 3ª. Edición. Reverte, Barcelona, España.

## EL USO DEL ADN AMBIENTAL EN EL ESTUDIO DE CUERPOS DE AGUA: UNA PROPUESTA PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN MÉXICO.

**RICARDO IVÁN CRUZ-CANO**

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA Y POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS, UNAM

**MELANIE KOLB**

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

**LUZ BRETÓN-DEVAL**

INSTITUTO DE BIOTECNOLOGÍA, UNAM

**ALEJANDRO ALDAMA CERVANTES**

POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM

**NORMA BERENICE CRUZ-CANO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA, UNAM



**Resumen:** La falta de datos sobre calidad hídrica en México, recalca la necesidad de implementar tecnologías nuevas para mejorar el monitoreo en cuerpos de agua. Un enfoque usado recientemente y prometedor en los monitoreos, es el uso del ADN ambiental, caracterizado por analizar una mezcla de material genético, inmersa en una matriz ambiental. Este tipo de estudios se han enfo-

cado en la identificación de especies, detección de patógenos, especies en peligro, invasoras, etcétera; demostrando la flexibilidad de dicha metodología. Aplicar esta metodología de frontera en México, complementará la información obtenida por las normatividades nacionales, cuyo enfoque es el consumo humano; generando de esta forma, un sistema de alerta temprana en los sitios, así como establecer líneas base sobre el estado de los cuerpos de agua; contribuyendo a la gobernanza hídrica, mediante la capacidad de vincular a la academia, tomadores de decisiones y usuarios de los distintos servicios ecosistémicos hídricos.

## Introducción.

La degradación de los distintos tipos de hábitat, sobreexplotación de zonas productivas, alteraciones en las dinámicas tróficas y cambios en la composición de las comunidades, han encendido focos rojos para comenzar a desarrollar métodos efectivos de manejo y administración en los diversos sistemas ambientales a nivel global, para lo cual, en algunas partes del mundo se han comenzado a tomar acciones con la finalidad de conservar los distintos servicios ecosistémicos que se relacionan a la biodiversidad en un sistema (Senapati et al. 2019).

Para poder lograr ello, el monitoreo es una herramienta clave, ya que permite generar una línea base de las condiciones del sistema, e inferir las dinámicas que se dan en este, evaluando así su condición y permitir compararla a lo largo del tiempo (Williams & Kelly, 2016). Sin embargo, para ser exitoso, un programa de monitoreo debe ser efectivo (producir información de la calidad necesaria), eficiente (producirlos a un costo relativamente bajo) y factible (producirlo con los recursos disponibles). El monitoreo de cuerpos de agua

proporciona información detallada sobre un sitio en particular y sus cambios a través del tiempo, así como los efectos de diferentes impactos sobre la biodiversidad (Bohmann et al. 2014, Williams y Kelly 2016). Estas evaluaciones emplean la caracterización fisicoquímica, y en ocasiones organismos bioindicadores.

De manera particular, en México, alrededor del 50% de la red hidrográfica se considera contaminada o fuertemente contaminada y la información recabada por CONAGUA (5028 sitios de monitoreo para un país de casi 2 millones de km<sup>2</sup> y 633 mil km de ríos) muestra que la condición de los diversos cuerpos de agua va en detrimento, tanto para el consumo humano, como para la persistencia de las diferentes formas de vida asociadas a ellos (CONAGUA 2019). Por una parte, el monitoreo de agua en México tradicionalmente se ha basado en pocos criterios fisicoquímicos enfocados en el consumo humano, en vez de considerar las dinámicas y funciones del sistema ambiental; y en aquellos casos en que se ha recurrido al uso de bioindicadores, se ha obtenido información complementaria y con mejor

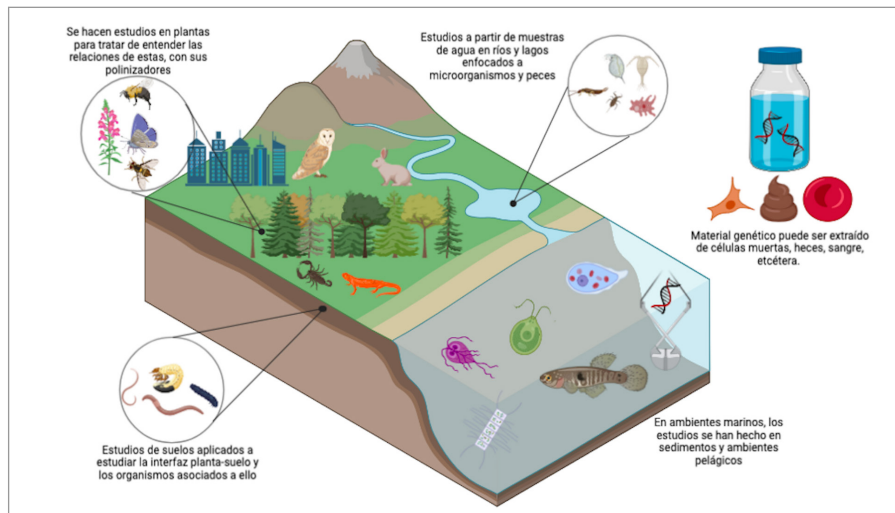
resolución, pero son dependientes de que existan condiciones adecuadas en campo, un grado de conocimiento en los monitores, así como equipo especializado para los grupos a estudiar, volviéndolos invasivos, caros y tardados. (Yoccoz 2012, Williams y Kelly 2016).

## Desarrollo

Adoptar nuevas tecnologías como la Secuenciación de Nueva Generación, permitirá detectar material genético de múltiples organismos en una muestra estudiada y así obtener mucha información que se pueda emplear en la reconstrucción de las comunidades biológicas. Un enfoque que ha sido usado recientemente y que promete ser un método efectivo

para la mejora del monitoreo es el uso del ADN ambiental (eDNA por sus siglas en inglés), que consiste en analizar una mezcla de material genético, compuesta de moléculas de cadena simple o doble, con origen genómico, mitocondrial, plastídico o exosómico; mismo que se origina de organismos activos, inactivos o lisados, así como originado de las heces, saliva, orina, y células de organismos de múltiples especies, véase Figura 1 (Rees et al. 2014, Shaw et al. 2017, Pawlowski et al. 2020)

Figura 1.



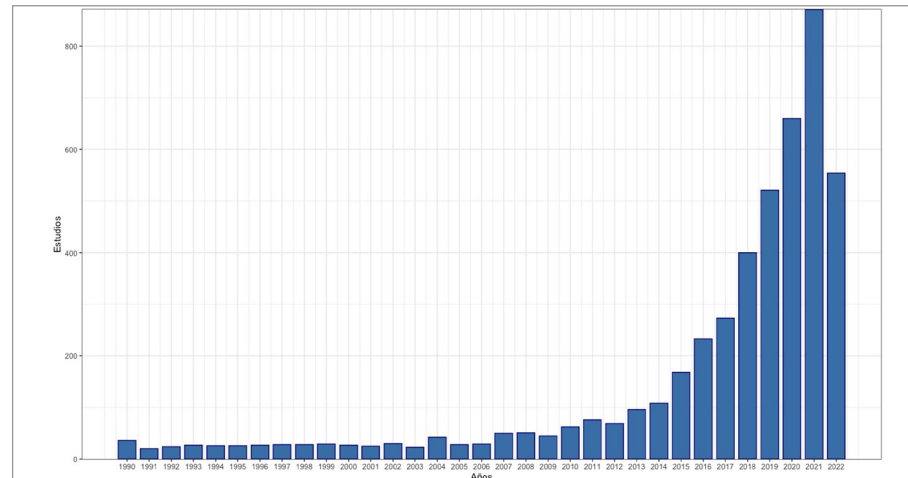
A partir de los años 2000, el término eDNA se volvió más usado en un contexto de biodiversidad, principalmente basados en la descripción de nuevos phylla de microorganismos, el monitoreo de organismos con importancia médica, y estudios para determinar la presencia o ausencia de especies en peligro, véase Figura 2 (Bohman et al. 2014, Williams y Kelly 2016). Posteriormente, este enfoque comenzó a adaptarse a la diversidad de eucariontes de mayor tamaño, demostrando ser una manera, rápida, eficiente y no invasiva para estudiar a los organismos en el ambiente, a diferencia de los monitoreos convencionales, en los que se necesita una gran cantidad de equipo especializado para

estudiar grupos muy específicos, experiencia para la identificación morfológica de las especies, y mucho esfuerzo de muestreo (Shaw et al. 2017, Pawlowski et al. 2020)

### -El uso del ADN ambiental en aguas epicontinentales

Los estudios concentrados en aguas epicontinentales han tenido como principales objetivos hacer una caracterización de las comunidades biológicas, con la finalidad de poder determinar la calidad, dinámicas

Figura 2.



y funciones de los cuerpos lóticos y lénticos. Los grupos estudiados por excelencia son peces, plancton y el monitoreo de especies invasoras, sobre todo de vertebrados (Dejean et al. 2012, Pawlowski et al. 2022). De manera particular, los ríos son los cuerpos de agua menos estudiados, debido a la dinámica que presentan, caracterizada por un elevado recambio de agua, arrastre continuo de sedimentos, y una zonación muy marcada. Eso a pesar de que son los ecosistemas que más cambios han sufrido y que más especies han perdido en las últimas décadas (IPBES 2019), y a su capacidad de interconexión entre ecosistemas. De manera particular, los ríos transportan agua y nutrientes a lo largo del planeta y drenan cerca del 75% de la superficie terrestre, demostrando el papel crucial que tienen para la conservación de biodiversidad, uso humano, y la regulación que brindan a los procesos de los ecosistemas (Shaw et al. 2017).

Por una parte, para los sistemas lóticos debido a la capacidad de recambio constante del agua, una de las principales aproximaciones es recolectar sedimentos de los primeros 10 cm de profundidad para

tratar de hacer una buena caracterización de las comunidades bentónicas; asimismo, los principales grupos estudiados en estos cuerpos de agua son los macroinvertebrados bentónicos y las diatomeas presentes en los sedimentos. Mientras que, para los sistemas lénticos, los estudios tienden a concentrarse en la reconstrucción de las composiciones comunitarias de lagos, a partir de bancos de estructuras de resistencia (quistes, esporas, etc.) sedimentos presentes, para poder extraer núcleos de sedimento, permitiendo obtener reconstrucciones paleoclimáticas y paleobiológicas por medio de estos núcleos (Bohmann et al. 2014, Pawlowski et al. 2022).

Emplear una amplia gama de microorganismos a partir del uso del ADN para la determinación del estado de los cuerpos de agua representaría una innovación en el monitoreo de la calidad del agua en México. La metodología a ser establecida y los datos generados podrán ser de relevancia para la toma de decisiones sobre medidas sanitarias y manejo de los cuerpos de agua. Dada la vinculación con iniciativas de monitoreo participativo local y de instituciones federales, se abre la posibilidad de

fortalecer la gobernanza de los cuerpos de agua epicontinentales a diferentes niveles, donde destaca el nivel local con la posibilidad de generar acuerdos con la población sobre cómo manejar estos riesgos e identificar focos de infección. Asimismo, se podrá complementar la información obtenida de las normatividades nacionales vigentes a la calidad del agua con el conocimiento de microorganismos presentes en los cuerpos de agua de México. La aplicación de esta metodología de frontera en México permitirá establecer líneas base sobre la ocurrencia y distribución de los microorganismos acuáticos, así como la identificación de posibles patógenos.

## Conclusiones.

En los últimos años, los estudios enfocados a la biodiversidad han comenzado a adoptar el enfoque genómico. Esto gracias al uso del eDNA, el cuál ha demostrado tener un gran potencial para generar información sobre el estado de la biodiversidad en distintos ecosistemas, pero también a partir de diversas matrices ambientales. Hoy en día no pode-

mos decir que esta aproximación ya se encuentra lista para reemplazar a los monitoreos convencionales de biodiversidad, puesto que aún existen ciertas áreas de oportunidad que se deben trabajar; sobre todo las relacionadas con la resolución taxonómica de la secuenciación, la homogenización en los métodos de toma de muestra, extracción de ADN, y disponibilidad de datos con los cuales poder comparar la información generada.

Asimismo, los beneficios de emplear esta técnica son evidentes, pero otra de las dificultades asociadas, tiene que ver con que muchos ecólogos carecen del conocimiento necesario para incorporar este método a sus campos de investigación, por lo que es imperativo empezar a involucrarse en esta herramienta que tiene un gran potencial para poder caracterizar adecuadamente la biodiversidad.

La aplicación de esta metodología de frontera en México, permitirá complementar la información obtenida por las normatividades nacionales vigentes respecto a la calidad del agua, cuyo enfoque es el consumo humano y unos pocos microorganismos; generando de esta forma, la posibilidad de



contar con un sistema de alerta temprana en los sitios, pero sobre todo, establecer líneas base sobre la ocurrencia y distribución de los organismos, de forma eficiente, efectiva y factible.

Finalmente, contar con este tipo de información tendrá un papel importante en la gobernanza hídrica, sobre todo en la capacidad de articular y vincular a la academia, tomadores de decisiones y usuarios de los distintos servicios ecosistémicos hídricos para una gestión más adecuada de los sistemas acuáticos. 💧

## Bibliografía

- Bohmann, K., Evans, A., Gilbert, M., Carvalho, G., Creer, S., Knapp, M., Yu, D., de Bruyn, M. (2014). Environmental DNA for wild-life biology and biodiversity monitoring. *Trends in Ecology & Evolution*. 29(6): 358-367. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2014.04.003>.
- CONAGUA (2021). Calidad del agua en México. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- Dejean, T., Valentini, A., Miquel, C., Taberlet, P., Bellemain, E., Miaud, C. (2012). Improved detection of an alien invasive species through environmental DNA barcoding: the example of the American bullfrog *Lithobates catesbeianus*. *Journal of Applied Ecology* 2012, 49, 953-959. doi: [10.1111/j.1365-2664.2012.02171.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02171.x)
- Pawlowski, J., Apothéoz-Perret-Gentil, L., Altermatt, F. (2020). Environmental DNA: What's behind the term? Clarifying the terminology and recommendations for its future use in bio-monitoring. *Molecular Ecology*. 29:4258-4264. DOI: [10.1111/mec.15643](https://doi.org/10.1111/mec.15643)
- Pawlowski, J., Bruce, K., Panksep, K., Aguirre, F., Amalfitano, S., Apothéoz-Gentil, I., Baussant, T., Bouchez, A., Carugati, L., Cermakova, K., Cordier, T., Cornadelsi, C., Costa, F., Dano-

- varo, R., Dell'Anno, A., Duarte, S., Eisendle, U., Ferrari, B., Frontalini, F., Frühe, L., Haegerbaeumer, A., Kisand, V., Krolicka, A., Lanzén, A., Leese, F., Lejzerowicz, F., Lyautey, E., Macek, I., Sagova-Mareckova, M., Pearman, J., Pochon, X., Stoeck, T., Vivien, R., Weigand, A., Fazi, S. (2022). Environmental DNA metabarcoding for benthic monitoring: A review of sediment sampling and DNA extraction methods. *Science of the Total Environment* 818 (2022) 151783. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151783>
- Rees, H., Maddison, B., Middleditch, D., Patmore, J., Gough, K. (2014). The detection of aquatic animal species using environmental DNA: A review of eDNA as a survey tool in ecology. *Journal of Applied Ecology*: 51:1450-1459. doi: [10.1111/1365-2664.12306](https://doi.org/10.1111/1365-2664.12306)
- Senapati, D., Bhattacharya, M., Kar, A., Chini, D., Das, B., Patra, B. (2019). Environmental DNA (eDNA): A promising biological survey tool for aquatic species detection. *Proceedings of Zoological Society*. 72(3): 211-228. <https://doi.org/10.1007/s12595-018-0268-9>.
- Shaw, J., Weyrich, L., Cooper, A. (2016). Using environmental eDNA sequencing for aquatic biodiversity survey: a beginner's guide. *Marine and Freshwater Research*. <http://dx.doi.org/10.1071/MF1536>.
- Yoccoz, N.G. (2012) The future of environmental DNA in ecology. *Mol Ecol* 21, 2031–2038.
- Williams, G., Kelly, R. 2016. A framework for inferring biological communities from environmental DNA. *Ecological Applications*. 26: 1645-1659. <https://doi.org/10.1890/15-1733.1>.

# PRONÓSTICO DE SEQUÍAS Y ESTIMACIÓN DE IMPACTOS ECONÓMICOS EN UNA CUENCA HIDROLÓGICA MEDIANTE *MACHINE LEARNING*

JESÚS ALBERTO CEBALLOS-TAVARES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA CAMPUS IMTA

DAVID ORTEGA-GAUCIN

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA



## Resumen

En los últimos años, debido a la gran relevancia y contribución que han tenido los métodos basados en inteligencia artificial en la modelización y predicción de los procesos hidrológicos y climáticos, las técnicas de aprendizaje automático –mejor conocidas como *machine learning*– han sido utilizadas para la evaluación, monitoreo y pronóstico de la sequía. En diversas partes del mundo se han utilizado ampliamente estas técnicas, pero en México existe una brecha importante al respecto, por lo que hay áreas de oportunidad que pueden ser exploradas. Por ello, el presente trabajo tiene como objetivo

presentar la metodología que se propone para generar escenarios de pronóstico de sequías meteorológicas e hidrológicas en una cuenca hidrológica (la del río Conchos), mediante el uso de redes neuronales artificiales (ANN, por sus siglas en inglés), y a partir de ellos estimar los impactos económicos por sequía hidrológica en los distritos de riego de la cuenca.

## Introducción

La sequía es uno de los fenómenos climatológicos que causa mayor impacto en la sociedad, ya que afecta de manera generalizada los lugares donde

se presenta, siendo la agricultura el principal sector afectado. Aunado a esto, las proyecciones climáticas para las próximas décadas sugieren que las sequías serán más frecuentes y severas en muchas partes del mundo; previéndose un aumento de daños como resultado del crecimiento poblacional y de los cambios en las condiciones climáticas en los diferentes sectores socioeconómicos y ambientales (IPCC, 2014).

Por lo cual, resulta fundamental tener un mejor entendimiento de los mecanismos que controlan el clima, por lo que el análisis de futuros escenarios de sequía es un aspecto de gran relevancia en el planteamiento y manejo de sistemas de recursos hídricos, contribuyendo a la gestión apropiada del riesgo como medida de prevención y respuesta ante el desastre (Bruins, 2003).

En los últimos años, los métodos basados en *machine learning*, han cobrado gran relevancia en la modelización y predicción de los procesos hidrológicos y climáticos (Ardabili *et al.*, 2019). Dentro de éstos, las redes neuronales artificiales se han utilizado con éxito en estudios de: reconstrucción

de series de datos, pronóstico de caudales, pronóstico de escenarios de sequía, pronósticos de rendimientos en cultivos, entre otros (ver p. ej. Mishra & Singh, 2011; Hao *et al.*, 2018; Fung *et al.*, 2019; y Prodhon *et al.*, 2022).

Existen diversas revisiones de literatura relacionadas con la aplicación de métodos de ML al estudio de la sequía, las cuales destacan que este tipo de modelos ha superado a los modelos tradicionales que no están basados en inteligencia artificial, con las ventajas de un menor entrenamiento estadístico y su propiedad no lineal, y considerándose además herramientas confiables para predecir diferentes índices de sequía (Son *et al.*, 2021; Alawsi *et al.*, 2022; Prodhon *et al.*, 2022).

Sin embargo, la aplicación de estos tipos de métodos de ML con relación al análisis de la sequía en México es escasa. Por otra parte, existen diversos estudios dentro y fuera del país que han tratado de distintas maneras el pronóstico del rendimiento en los cultivos, sin considerar como tal el valor de la producción en sus investigaciones. Por ello, lo que se pretende en esta investigación, es determinar

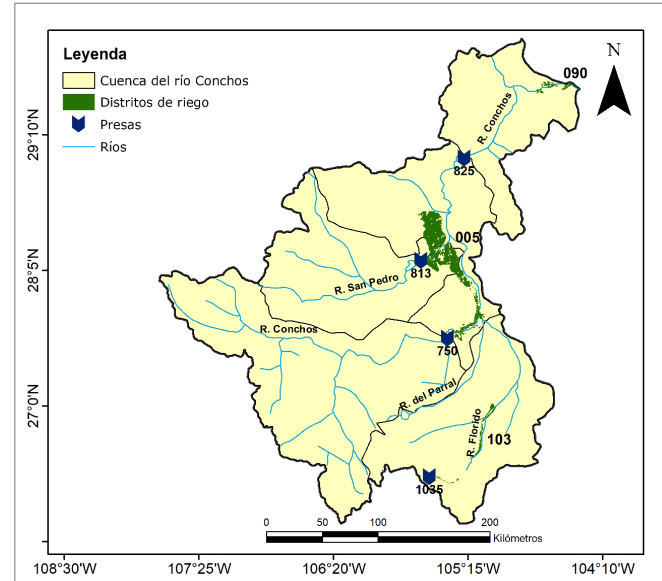
mediante variables climáticas, hidrológicas, agrícolas e índices de sequía, el efecto que las sequías pueden ocasionar en el valor de la producción de los distritos de riego para los siguientes años agrícolas.

Aunque en la cuenca del río Conchos se han realizado diversos estudios sobre la sequía o el cambio climático, no se ha abordado del todo el tema de la generación de pronósticos de escenarios por sequía, lo cual representa un área de oportunidad que es considerada por la presente investigación.

### Área de estudio

La cuenca del río Conchos se ubica dentro de la RH-24 Bravo-Conchos (Véase Figura 1), la cual constituye uno de los sistemas hidrológicos más importantes de México, en donde la sequía representa un problema recurrente (Ortega-Gaucin, 2013; Martínez e Irula, 2016). En ella se localizan tres distritos de riego: 005 Delicias, 090 Bajo río Conchos, y 103 Río Florido, Chihuahua, con una superficie total de 128,137 hectáreas; y cuatro presas principales: La Boquilla, Francisco I. Madero, Luis L. León y San Gabriel, que son las que suministran agua a los distritos de riego.

Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Conchos. Fuente: Elaboración propia.



Por su ubicación constituye una zona muy árida-semiárida casi en su totalidad, sobre todo hacia las partes medias y bajas de la cuenca, mientras que las partes más altas predominan los climas

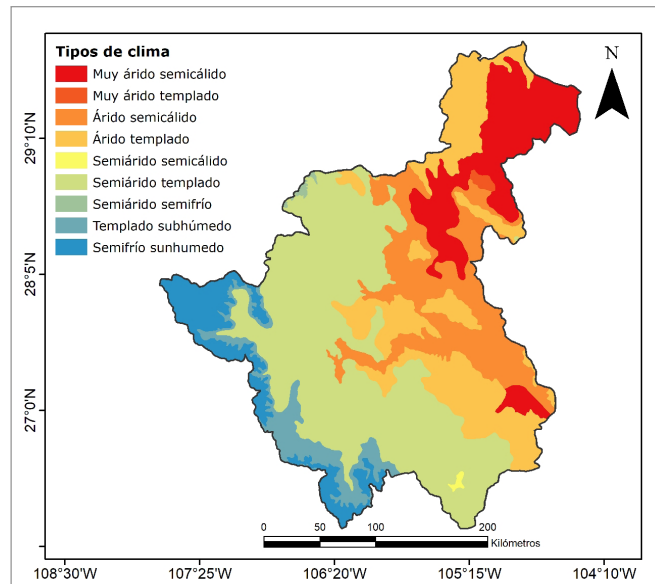
templados a semifríos (Véase Figura 2). Su precipitación es del tipo monzónico (máximo de lluvias en verano), concentrándose los mayores valores en los meses de julio y agosto. La precipitación acumulada del periodo húmedo representa el 75.3% de la precipitación total anual captada en la cuenca; para el periodo 1970-2020 la precipitación media anual corresponde a 467.47 mm. La precipitación varía entre 200 y 800 mm a lo largo de la cuenca (Véase Figura 3). Los valores más bajos se encuentran hacia la parte media y baja de la cuenca, y los altos corresponden a la parte montañosa.

## Metodología

De manera general, para el desarrollo de la investigación se proponen los siguientes puntos a seguir dentro de la metodología (Véase Figura 4):

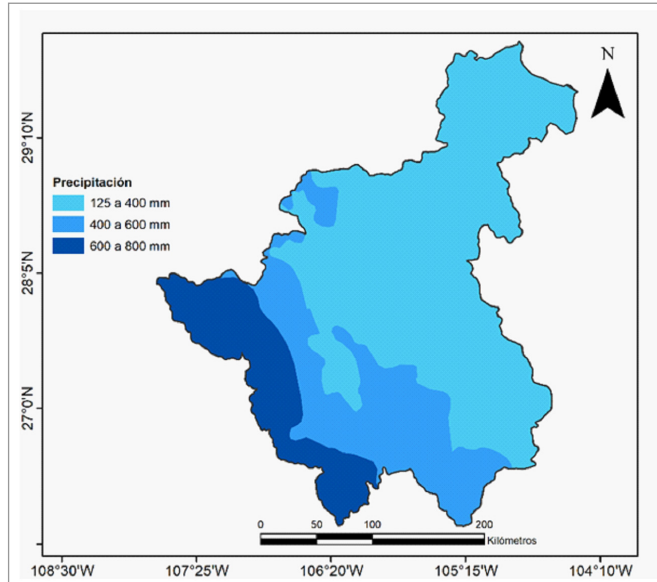
- 1) Obtener la información a utilizar de datos climatológicos (precipitación, temperatura máxima, mínima y media mensuales); hidrológicos (almacenamientos y escurrimientos mensuales); agrícolas (superficies sembra-

**Figura 2. Tipos de clima en la cuenca del río Conchos. Fuente: Elaboración propia.**



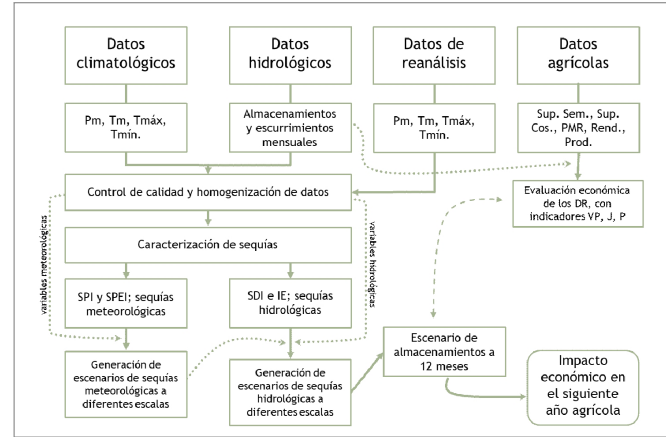
das y cosechadas, rendimiento, producción y jornales); y series de reanálisis mensuales provenientes de las bases de datos del CRU TS (Climate Research Unit) en su versión

Figura 3. Precipitación media anual en la cuenca del río Conchos. Fuente: Elaboración propia.



4.05, con el propósito de utilizar estas series de reanálisis como series de referencia para aquellas estaciones climatológicas que se vean afectadas por huecos de información.

Figura 4. Diagrama de flujo de trabajo de la metodología propuesta. Fuente: Elaboración propia.



- 2) Realizar el análisis de control de calidad y homogenización de la información climatológica (mediante la paquetería CLIMATOL del lenguaje de programación R), e hidrológica (mediante pruebas estadísticas como la de Helmert, T-student, Pettit, Fisher y la prueba de independencia de Anderson).

- 3) Analizar y caracterizar los periodos secos ocurridos en la cuenca del río Conchos, empleando el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI), para los periodos de sequía meteorológica; y el Índice de Sequía de los Caudales Fluviales (SDI) e Índices de Estado (IE), para los de sequía hidrológica.
- 4) Plantear escenarios de pronóstico de sequías meteorológicas e hidrológicas (1, 3, 6, 9 y 12 meses) mediante el método de redes neuronales artificiales, utilizando el entorno de Python con TensorFlow en el que las potenciales variables de entrada a la ANN serán aquellos datos obtenidos de las estaciones climatológicas e hidrométricas, así como los valores estimados de los diferentes índices evaluados (SPI, SPEI, SDI e IE).
- 5) Estimar el impacto económico del déficit de escurrimientos superficiales a partir de los pronósticos generados por las ANN en los distritos de riego de la cuenca, mediante el esta-

blecimiento de relaciones funcionales entre el volumen de agua utilizado en la producción agrícola y los beneficios que ésta genera, en términos monetarios o en generación de empleos agrícolas.

- 6) Finalmente, con toda la información analizada, se propondrán diferentes modelos de variables para obtener aquellas que mejor se ajusten en la creación de una nueva red neuronal específica para el pronóstico de los impactos por sequía en los distritos de riego.

## Conclusiones

La propuesta de construir escenarios de pronóstico de sequía por medio de redes neuronales artificiales, resulta ser una buena alternativa ante los métodos tradicionales de evaluación, monitoreo y pronóstico de las sequías, debido a que permiten analizar los patrones no lineales del fenómeno de mejor manera, logrando generar pronósticos más confiables. Asimismo, permiten estimar los impactos económicos por sequía hidrológica en los distritos de riego de la cuenca, generando así una



herramienta que pueda servir a los planificadores y tomadores de decisiones en posibles eventos futuros de sequía, con un mejor producto que los obtenidos con la hidrología probabilística tradicional. 💧

### Bibliografía

- Alawsi, M.A., Zubaidi, S.L., Al-Bdairi, N.S.S., Al-Ansari, N., Hashim, K. (2022). Drought forecasting: A review and assessment of the hybrid techniques and data pre-processing. *Hydrology*, 9, 115. <https://doi.org/10.3390/hydrology9070115>
- Ardabili, S., Mosavi, A., Dehghani, M., y Varkonyi-Koczy, A.R. (2019). A Deep learning and machine learning in hydrological processes climate change and earth systems a systematic review. *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints201908.0166.v1>
- Bruins, H. J. (2003). Manejo del agua en periodos de sequía. *Ingeniería del Agua*, 10(3), 327-335.
- Fung, K. F., Huang, Y. F., Koo, C.H. and Soh, Y. W. (2020). Pronóstico de sequía: una revisión de los enfoques de modelado 2007-2017. *Journal of Water and Climate Change*, 11(3), 771–799. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.236>
- Hao, Z., Singh, V. P. and Xia, Y. (2018). Seasonal drought prediction: Advances, challenges, and future prospects. *Reviews of Geophysics*, 56, 108–141. <https://doi.org/10.1002/2016RG000549>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment

Report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Martínez, P.F. e Irula, F. (2016). Tendencias de precipitación y cambio climático en la cuenca del río Conchos, México. *Aqua-LAC*, 8(2), 79-88.

Mishra, A.K. & Singh, V.P. (2011). Drought modeling: A review. *Journal of Hydrology*, 403, 157-175. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.049>

Ortega-Gaucin, D. (2013). Caracterización de las sequías hidrológicas en la cuenca del río Bravo, México. *Terra Latinoamericana* 31(3), 167-180.

Prodhon, F. A., Zhang, J., Hasan, S.S., et al. (2022). A review of machine learning methods for drought hazard monitoring and forecasting: Current research trends, challenges, and future research directions. *Environmental Modelling & Software*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105327>

Son, B., Im, J., Park, S. & Lee, J. (2021). Satellite-based drought forecasting: research trends, challenges, and future directions. *Korean Journal of Remote Sensing*, 37(4), 815-831. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2021.37.4.11>

## ESTRATEGIAS PARTICIPATIVAS MULTINIVEL PARA LA GESTIÓN LOCAL DEL AGUA Y DEL SANEAMIENTO EN EL TERRITORIO HIDROSOCIAL DE LA CUENCA DEL RÍO APATLACO

FRANCISCO ANTONIO RAMÍREZ ROJAS  
ALEJANDRA PEÑA GARCÍA  
CAROLINA ESCOBAR NEIRA  
JUANA AMALIA SALGADO LÓPEZ  
NATALIA CHAVES LÓPEZ  
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA



### Resumen

El presente texto resume de manera general el trabajo de tesis que el autor principal está desarrollando en el programa de doctorado de seguridad hídrica con área de concentración en gobernanza del agua, en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en este trabajo se buscan abordar todos los aspectos relacionados con las organizaciones locales de agua (OLA), las que, forman parte de una compleja realidad y están insertas dentro del contexto territorial de la cuenca hidrográfica del río Apatlaco del estado de Morelos.

En dicho contexto territorial son objeto de estudio aspectos sociales de las comunidades que la conforman, las relaciones de poder implícitas, aspectos políticos, económicos y legales, relacionadas con la gestión de las aguas subterráneas o superficiales. Se plantea por tanto entender cómo es que las OLA's funcionan, en qué se diferencian entre ellas y de otras entidades encargadas del agua a nivel local, pero principalmente como logran ser autónomas y gestionar de manera resiliente situaciones adversas y generar procesos de gobernanza en sus comunidades.

## Antecedentes

Este estudio tiene como uno de los principales objetivos el poder de manera participativa caracterizar y analizar todos aquellos aspectos relacionados con la gobernanza del agua que en otros estudios no han sido visibilizados del todo, para a partir de ello diseñar estrategias que coadyuven a fortalecer a estas organizaciones lo cual en sí mismo es el objetivo principal de este trabajo, el cual se encuentra inserto en un proyecto interno de la sub coordinación de participación social del IMTA, denominado “Fortalecimiento de las organizaciones locales del agua” el cual se venía realizando desde hace dos años.

El proyecto interno ya contaba con un censo de las OLA's previo realizado el año 2021, por lo que, a partir de esta información y del trabajo conjunto con una alumna del postdoctorado también en el IMTA se comienza el trabajo de la presente tesis, del que como primeras aproximaciones al trabajo ya realizado se comienza con la revisión y actualización del censo del 2021 de las OLA's , debido a que en todos los municipios de Morelos se acababa de gestar la alternancia en gobiernos municipales y

eran inminentes los cambio en los comités encargados de las OLA's.

## Problema de investigación

Las relaciones de la sociedad con el agua dan como resultado una diversidad de territorios, paisajes y configuraciones hidrosociales complejas (Boelens, 2017), manifiestas en las relaciones entre la sociedad y el agua (la naturaleza) y de sus relaciones materiales, experienciales, culturales y hasta metafóricas, en un proceso relacional y dialéctico Syngedouw (2009).

Estas relaciones internas generalmente no suelen ser tomadas en cuenta por parte de los planeadores, gestores y diseñadores de políticas, pues existe un marcado predominio de la visión técnica instrumental del agua superficial y subterránea, plasmada en políticas y programas diseñados y aplicados de arriba hacia abajo.

Como resultado de este modelo de gestión se experimentan en prácticamente todo el territorio nacional, relaciones sociedad-agua (hidrosociales) en crisis, lo que queda de manifiesto en situacio-

nes como la contaminación de cuerpos de agua, la sobreexplotación de las aguas superficiales y subterráneas, la falta de acceso al agua potable y al saneamiento, la conflictividad social asociada a estos problemas, entre otras.

Para la atención adecuada a la situación hidrosocial crítica que se describe se precisa superar la visión unilateral y dominante de las “hidrocracias” y, en consecuencia, dar cabida a otras ontologías y epistemologías sociohídricas locales, desde donde se diagnostiquen, caractericen y construyan los problemas, y se definan las prioridades y se diseñen participativamente las soluciones para restituir los territorios hidrosociales, desde enfoques de gestión multinivel.

La cuenca del río Apatlaco es una cuenca en crisis que se encuentra inmersa en una dinámica de superurbanización y con una actividad industrial relevante, que está poniendo al límite los sistemas sociohídricos (superficiales y subterráneos) con graves consecuencias, particularmente, para las comunidades ubicadas en las zonas rurales y periurbanas de la cuenca. Estas características son

compartidas por muchas cuencas del país que están sometidas a procesos y dinámicas sociohídricos y territoriales similares que están generando significativos intercambios de agua entre usos, usuarios en el contexto de la cuenca.

Una gestión local del agua participativa, consensuada y articulada, en la que las diversas configuraciones hidrosociales del territorio de la cuenca estén presentes, que pase por el fortalecimiento de las instituciones sociales y colectivas del agua y el saneamiento, contribuiría a la restauración de los territorios sociohídricos de la cuenca, de abajo hacia arriba.

### Justificación

La investigación que se está desarrollando cobra relevancia debido a que considera un componente novedoso que consiste en la implementación de estrategias de gestión local participativas del agua superficial y subterránea, en el contexto de la cuenca, planificado y consensuado entre comunidad, actores locales del agua y el saneamiento y actores clave, bajo principios de gobernanza mul-

tinivel encaminado a dar respuestas locales a los problemas sociohídricos de la cuenca, buscando con ello incidir en el bienestar de grupos de población rural, periurbana y urbana en un mediano y largo plazo.

La gestión del agua se basa en un modelo de transferencias de grandes volúmenes de agua a través de la construcción de grandes obras hidráulicas que generan diversos problemas sociales, ambientales e hidrológicos difíciles de revertir. Apostar al fortalecimiento de la gestión local del agua, de abajo hacia arriba, desde los actores locales del agua y el saneamiento es una apuesta que puede rendir buenos frutos en el corto, mediano y largo plazo. La visualización y valoración de saberes y prácticas locales colectivas que llevan a cabo actores locales dentro de una cuenca es un eslabón clave que puede hacer importantes diferencias en los territorios hidrosociales.

A lo largo del proceso de investigación se busca generar y sistematizar conocimiento útil para las comunidades de los contextos y realidades locales y de cuenca que coadyuven en la toma política de

decisiones respecto a su agua y su territorio. Las estrategias de gestión participativa del agua y del saneamiento que se buscan generar con este proyecto pueden ser la base de planes y acciones que los actores sociales clave deberán emprender, gestionar, articular, ajustar a fin de lograr una gestión local del agua fortalecida, sostenible y eficaz que además permita, bajo marcos normativos, institucionales y políticos desde las bases, restituir la cuenca del Apatlaco como territorio hidrosocial.

## Objetivo General

Diseñar estrategias participativas de gestión local del agua y el saneamiento en la cuenca del río Apatlaco, consensuadas y articuladas, para la restitución del territorio y de sus configuraciones hidrosociales.

## Hipótesis

Por medio de la implementación de estrategias de gestión local del agua superficial y subterránea en la cuenca del río Apatlaco, construidas desde las comunidades, a partir de la identificación de las configuraciones hidrosociales, es posible llegar a

restituir el territorio hidrosocial de la cuenca, contribuyendo con esto en perfilar una gestión local del agua robusta, sostenible y eficaz, que sea capaz de prevenir conflictos y dar soluciones integrales a las problemáticas relacionadas con el agua y el saneamiento.

### Marco teórico

A lo largo de la investigación será abordado considerando referentes teóricos y conceptuales: la ecología política, territorios, paisajes y configuraciones hidrosociales y gobernanza multinivel. La convergencia de temas comunes en la literatura que puedan ser abordados con la ayuda de esta entidad tripartita pues permitirá una aproximación a la realidad que coadyuve a entender, explicar y facilitar aquellos procesos en que los actores locales apuesten a modificar su realidad.

Las principales características y enfoques de cada uno de estos referentes teóricos y conceptuales, no se deberán, leer, estudiar o entender de forma aislada puesto que existe una interrelación entre ellos, al visualizarlos como partes constitu-

yentes de un todo y que a su vez funcionan como un sistema es posible inclusive acoger nuevos enfoques que surjan a partir del trabajo de campo y por ende los pilares conceptuales son tanto un continuo como un sistema abierto.

### Metodología

Para poder llevar a cabo la investigación se han considerado cuatro diferentes momentos metodológicos, los cuales, de manera particular, constituyen metodologías y productos específicos que coadyuvan en construir estrategias participativas de gestión local del agua. Su división obedece a la temporalidad en la que cada uno se pueda desarrollar, existiendo cierta dependencia entre ellas, en términos de información y datos que se generen. No obstante, la separación de los momentos metodológicos permite la flexibilidad de desarrollarlos a diferente velocidad, adaptarlos a la generación del trabajo de campo y ajustarlos cuando sea necesario.

## Productos esperados

Se busca que a partir de esta investigación se puedan proponer estrategias de forma colaborativa, de abajo hacia arriba, consensuadas y que se puedan articular y ser gestionadas por los actores involucrados. En este sentido, la investigación sentará las bases para una incidencia que apueste a una gestión local del agua fortalecida y sustentable en la que las diversas configuraciones hidrosociales presentes en la cuenca preserven el recurso desde un enfoque de derechos fundamentales y de justicia hídrica.

Se confía en que las restricciones derivadas de la pandemia se irán superando paulatinamente. Al ser el agua un recurso estratégico en permanente disputa por su control y usufructo, la desconfianza social se vislumbra como una probable limitante que se está tomando en cuenta en la planificación de los recorridos de campo y en la aproximación con los actores en general, a fin de hacer una selección cuidadosa y adecuada de las técnicas y herramientas de campo. Por último, se considera que la situación de inseguridad presente en muchas zonas del país podría representar una limitante para visi-

tar ciertos lugares y a ciertos actores. Se confía en que, al tratarse de un proyecto de investigación en la que los actores locales son los protagonistas, las limitaciones mencionadas con anterioridad pueden ser superadas. 💧



## Bibliografía

Boelens, R., Hoogesteger, J., Swyngedouw, E., Vos, J. & Wester, P. (2016). Hydrosocial territories: a political ecology perspective. *Water International*, 41(1), 1-14. DOI: [10.1080/02508060.2016.1134898](https://doi.org/10.1080/02508060.2016.1134898)

Swyngedouw, E. (1999). Modernity and Hybridity: Nature, Regenerationismo, and the Production of the Spanish Waterscape, 1890–1930. *Annals of the Association of American Geographers*, 89(3), 443-465, DOI: [10.1111/0004-5608.00157](https://doi.org/10.1111/0004-5608.00157)

# MODELO PARA MEJORAR LA GESTIÓN DEL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE PARA LOS HABITANTES DE LA CIUDAD DE MÉXICO

JORGE ALEJANDRO SILVA RODRÍGUEZ DE SAN MIGUEL  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DR. JOSÉ MARÍA LUIS MORA

## Resumen

El objetivo de esta investigación es diseñar un modelo para mejorar la gestión del suministro de agua potable para los habitantes de la Ciudad de México, considerando su problemática hídrica. En el diseño metodológico se elaboraron entrevistas semi-estructuradas para aplicarse a 17 directores vinculados con la gestión del suministro de agua potable en la ciudad, del Sistema de Aguas de la Ciudad de México y de las 16 alcaldías, tomando como base el modelo de Hooper. Entre los resultados sobresale la insuficiencia presupuestal para una buena gestión, y la normatividad que ocasiona la burocracia. Finalmente, se ofrecen hallazgos sobre

los cuales se puede profundizar en próximas investigaciones.

## Introducción

El agua dulce es un recurso vital para la humanidad en su bienestar, salud y seguridad. Además, existe el derecho humano al agua (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2016) y los Estados deben garantizarlo (Oficina del Alto Comisionado para los Derechos Humanos, 1966). Destaca que, a nivel global, 2,000 millones de personas no tienen acceso a servicios gestionados de forma segura; 138 países y cinco de las ocho



regiones de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) contaban con estimaciones de servicios gestionados con seguridad, lo que representa el 45% de la población mundial (World Health Organization & The United Nations Children's Fund, 2021, p. 8).

Por otra parte, México está conformado por 31 estados y la Ciudad de México. En cuanto a la Ciudad de México, esta se divide en 16 demarcaciones territoriales (Comisión Nacional del Agua, 2018, p. 16) y es una de las ciudades con mayor número de población a nivel global, posee una de las mayores economías de América (Secretaría de Desarrollo Económico de la Ciudad de México, 2021, p. 2), por lo que es un reto gestionar el agua, pues se presentan múltiples contrariedades (Torres, 2017, p. 95).

El problema de la investigación se resume de esta forma: los habitantes radicados en la Ciudad de México han sufrido un déficit en el suministro de agua potable con el modelo de gestión que prevalece. Por ello, el objetivo es diseñar un modelo para mejorar esta gestión.

## Desarrollo

Se realizó una revisión de la literatura científica sobre la gestión del agua potable en la Ciudad de México, así como en los modelos de esta gestión, en diferentes periodos de tiempo enfatizando lo contemporáneo, para después definir qué modelo se sigue en esta Ciudad.

El modelo en la Ciudad de México está enfocado en la oferta, se ha planteado la creación de nuevas obras, desde una perspectiva unidisciplinaria donde, de forma centralizada, se toman decisiones. También se tienen que considerar las desavenencias que han ocurrido al irse agotando las fuentes de agua y la búsqueda de nuevas (Torres, 2017, p. 109). Pues muchas ciudades grandes de México consumen más de este recurso del cual pueden proveerse con las fuentes próximas que tienen en su entorno, por lo que recurren a importarla de sitios lejanos (Pineda Pablos, Salazar Adams, Moreno Vázquez y Navarro Navarro, 2017, p. 188).

El modelo se encuentra politizado, es oportunista y depredador, pues dependiendo del partido político que milite en turno es la tendencia a corto

o mediano plazo que se le brinda al sector hídrico. Esto implica que haya rotación de altos funcionarios con la consecuente falta de planeación a largo plazo y coordinación que ocasiona que no se eleve la calidad en el servicio de agua (Pineda Pablos *et al.*, 2017, p. 178).

Con relación a Sosa-Rodríguez (2019, p. 102), el riesgo relacionado con el agua en la Ciudad de México está vinculado con los insuficientes recursos económicos y humanos que incidan positivamente en la toma de decisiones concerniente con una gestión que sea pronta y asertiva. Además, se presenta una carencia de voluntad política con la consecuente problemática de coordinación entre los diferentes órdenes de gobierno con las instancias responsables de la gestión, lo que ocasiona prácticas de gestión no sustentables. Pues también debería estar considerada en la gestión el desarrollo urbano y el territorio, aunado a sistemas de información confiables por parte de las autoridades intervinientes en la gestión. Por otra parte, el modelo de gestión hídrica está centrado en el sumi-

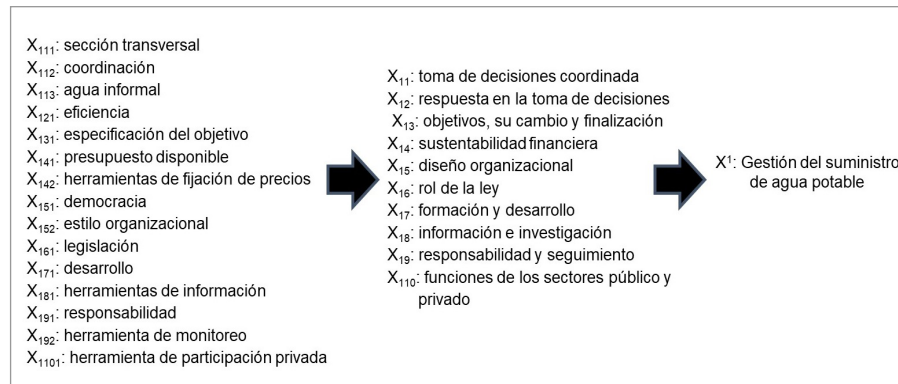
nistro del agua a los habitantes de la Ciudad sin incentivar el ahorro.

Por otra parte, para fines del trabajo de campo de esta investigación se seleccionó la técnica de investigación de la entrevista semiestructurada, para lo cual se determinó una muestra y se diseñó el instrumento.

El muestreo determinado fue por expertos que dependió del juicio y la comprensión del contexto por parte del investigador, que constó de 17 directores involucrados en la gestión del agua en la Ciudad de México, 16 de las alcaldías y 1 del Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

Para diseñar el instrumento se analizaron diferentes modelos de gestión del agua y se consideró apropiado el de Hooper (2006) por la vigencia en sus elementos que únicamente requirieron adaptarlos al contexto de la Ciudad de México (*Véase Figura 1*).

**Figura 1. Modelo para mejorar la gestión del suministro de agua potable para los habitantes de la Ciudad de México**



Fuente: elaboración propia con base en Hooper (2006).

Los resultados derivados de las entrevistas semiestructuradas mostraron disparidades y desafíos en el sistema de suministro de agua potable (Véase Figura 2).

## Conclusiones

El sistema de abastecimiento de agua potable en la Ciudad de México está lejos de ser efectivo de acuerdo con los estándares nacionales e internacionales. Este artículo indica que la eficiencia del sistema se ve

socavada por una serie de factores cubiertos en el modelo de Hooper (2006).

Entre los hallazgos encontrados se destaca la falta de presupuesto para operar mejor el suministro de agua potable, así como los cambios a la normativa de aguas que podrían agilizar los procesos y fortalecer su evaluación y seguimiento. Considerando estas dos subcategorías, las otras podrían mejorarse: toma de decisiones coordinada, respuesta en la toma de decisiones, objetivos, su cambio y cumplimiento, diseño organizacional, capacitación y desarrollo, información e investigación, rendición de cuentas y seguimiento; y las funciones de los sectores público y privado. Sin embargo, se requiere volun-

**Figura 2. Resultados obtenidos**

Subcategorías	Subcategorías	Principales hallazgos
X11: toma de decisiones coordinada	X111: sección transversal	Debe fortalecerse la transversalidad de las políticas del agua que impactan en otros sectores relacionados
	X112: coordinación	Es menester fortalecer la coordinación dentro de las mismas alcaldías, junto con el exterior: la sociedad y el SACMEX
	X113: agua informal	Es necesario robustecer los programas de agua para tener mayor control sobre el clandestinaje del recurso, así como incrementar el presupuesto para mejora de la infraestructura hídrica y la implementación de nuevos proyectos
X12: respuesta en la toma de decisiones	X121: eficiencia	Se requiere mayor presupuesto para mejorar la infraestructura y mejorar la eficiencia hídrica Es importante que se incremente y amplíe el número de programas de captación de agua de lluvia
X13: objetivos, su cambio y finalización	X131: especificación del objetivo	Es necesario buscar mecanismos que favorezcan la consecución de objetivos a largo plazo por lo que cada administración entrante debe evaluar minuciosamente los proyectos que brindaron resultados positivos para darles continuidad
X14: sustentabilidad financiera	X141: presupuesto disponible	El presupuesto ha sido una limitante para poder concretar proyectos para mejorar la gestión del suministro de agua potable
	X142: herramientas de fijación de precios	Históricamente, han ido en detrimento los precios del suministro de agua potable para recuperar los costos de operación incurridos en su gestión
X15: diseño organizacional	X151: democracia	La política hidrológica es cambiante en los sucesivos gobiernos que injieren en la gestión del suministro de agua potable
	X152: estilo organizacional	Es importante realizar actualizaciones periódicas que respondan a la realidad actual
X16: rol de la ley	X161: legislación	Es necesario su actualización para que responda a los retos actuales
X17: formación y desarrollo	X171: desarrollo	Se requiere incrementar y mejorar la capacitación del personal
X18: información e investigación	X181: herramientas de información	Es imperioso mejorar los canales de comunicación entre diferentes áreas
X19: responsabilidad y seguimiento	X191: responsabilidad	Se necesita mejorar la rendición de cuentas de acceso público
	X192: herramienta de monitoreo	Se requiere la inversión en proyectos de infraestructura con tecnología que permita tener bases de datos actualizadas sobre el comportamiento del agua durante el suministro
X110: funciones de los sectores público y privado	X1101: herramienta de participación privada	Se necesita tener una visión conjunta que favorezca al sector social

tad política, coordinación efectiva entre los principales actores y sensibilización por parte del sector social.

Esta investigación ofrece un modelo validado, con resultados generales, que puede tener un impacto positivo en las categorías analizadas. La investigación brinda hallazgos sobre los cuales se puede profundizar por otros autores. 💧

Fuente: elaboración propia.

## Bibliografía

- Comisión Nacional del Agua. (2018). Estadísticas del Agua en México, edición 2018. [https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf)
- Hooper, B. P. (2006). Key Performance Indicators of River Basin Organizations. US Army Corps of Engineering/IWR, Washington, D.C.
- Oficina del Alto Comisionado para los Derechos Humanos. (1966). Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales. <http://www.ohchr.org/SP/ProfessionalInterest/Pages/CESCR.aspx>
- Pineda Pablos, N., Salazar Adams, A., Moreno Vázquez, J. L. y Navarro
- Navarro, L. A. (2017). La gestión urbana del agua: entre el oportunismo y el desarrollo adaptativo. En C. Denzin, F. Taboada y R. Pacheco-Vega (Eds.), *El agua en México: Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica* (pp. 171-192). Fundación Friedrich-Ebert Stiftung, Ciudad de México.
- Secretaría de Desarrollo Económico de la Ciudad de México. (2021). Mexico City Economic Review. <https://www.sedeco.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Invierte%20en%20CDMX/Mexico%20City%20Economic%20Review%20.pdf>
- Sosa-Rodríguez, F. S. (2019). Factores que determinan la toma de decisiones en la gestión del agua en la Ciudad de México. En L.M. Martínez, S. Graf, E. Santana y S. García (Eds.), *El estudio del agua en México. Nuevas perspectivas teórico-metodológicas* (83-115). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Torres, L. (2017). La gestión del agua potable en la Ciudad de México: los retos hídricos de la CDMX: gobernanza y sustentabilidad. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-02055413>
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2016). *PHI-VIII: seguridad hídrica: respuestas a los retos locales, regionales y globales (2014-2021)*. [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000225103\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000225103_spa)
- World Health Organization & The United Nations Children's Fund. (2021). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: Five years into the SDGs. WHO and UNICEF, Geneva.

# AUMENTO EN LA PRODUCCIÓN DE PEROXIDISULFATO EN UN REACTOR DIVIDIDO POR UNA MEMBRANA DE INTERCAMBIO ANIÓNICO PARA DEGRADAR FENOFIBRATO

**RUBÍ DANIELA CASIMIRO CHÁVEZ**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (CAMPUS IMTA)

**PETIA MIJAYLOVA NACHEVA**

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

**IRMA ROBLES GUTIERREZ**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN ELECTROQUÍMICA

**IGNACIO MONJE RAMÍREZ**

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

**PANDIYAN THANGARASU**

FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM



## Resumen

Se cuantificó la cantidad de peroxidisulfato electrogenerado a partir del electrolito soporte y de radicales hidroxilos, con el objetivo de evaluar el aumento de su producción al introducir una membrana de intercambio aniónico que divide las zonas anódica y catódica de un reactor electroquímico. Adicionalmente se evaluó el efecto de varios parámetros ope-

rativos sobre la producción del peroxidisulfato y radical hidroxilo, así como sobre la degradación de fenofibrato. Se compararon las remociones en reactores divididos y sin dividir. En la zona catódica y anódica del reactor dividido se produjeron hasta  $32.98 \mu\text{M}$  y  $198.65 \mu\text{M}$  de peroxidisulfato, respectivamente. Mientras que, en el reactor sin dividir solo se generaron  $57.61 \mu\text{M}$  de peroxidisulfato. Las pruebas de degradación de fenofibrato mostraron porcentajes de degradación del 96.55% y 95.29% en la zona catódica y anódica, respectivamente, mientras que en el reactor sin dividir solo se alcanzó el 88.43%.



## Introducción

Los compuestos farmacéuticos han despertado una creciente preocupación, particularmente porque no se han establecido requisitos legales para su vertido en cuerpos de agua superficiales y porque están clasificados como contaminantes emergentes (Verlicchi et al., 2012, p. 124). Estos compuestos se han detectado en el medio acuático en diferentes porcentajes: analgésicos/antiinflamatorios (16%), antibióticos (15%), reguladores de lípidos (12%), antiepilépticos (9%), entre otros (Santos et al., 2010, p. 48). En el grupo de reguladores de lípidos se encuentra el fenofibrato (FNF), utilizado como antihiperlipidémico, en el tratamiento hipertrigliceridemia y la aterosclerosis (De oliveira et al., 2016, p. 545). Tanto el fenofibrato, como su metabolito activo, el ácido fenofibrico, se ha detectado en aguas subterráneas, superficial e incluso agua potable (Jung et al., 2021, p. 2).

La oxidación electroquímica es uno de los procesos de oxidación avanzada capaz de mineralizar completamente la materia orgánica no biodegradable. Se considera una tecnología amigable con el

medio ambiente, ya que no requiere productos químicos, solo corriente eléctrica (Anglada et al., 2009, p. 1747). En la oxidación electroquímica se distinguen dos mecanismos de oxidación:

- i) oxidación directa por transferencia de electrones que ocurre cuando el compuesto reacciona directamente en la superficie del ánodo (M) o por  $M(\bullet\text{OH})$  fisisorbido o  $\bullet\text{OH}$  quimisorbido, Ec. (1).



- ii) La oxidación indirecta que actúa a través de la generación electroquímica de un mediador en la solución, que facilita el transporte de electrones entre el electrodo y los compuestos orgánicos. Los mediadores son oxidantes fuertes, como el ozono ( $\text{O}_3$ ), el peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), el cloro activo, el bromo activo o  $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$  (Martinez-Huitle & Panizza, 2018, p. 2-5).

El objetivo de este estudio fue evaluar el aumento en la producción de peroxidisulfato y

radical hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ) en un reactor dividido por una membrana de intercambio aniónico usado para degradar el fenofibrato mediante oxidación electroquímica.

## Desarrollo

### A) Metodología

El sistema experimental consistió en un reactor sin dividir y un reactor dividido por una membrana de intercambio aniónico AMI-7001. Como ánodo se utilizó un electrodo de Nb/DDB marca Diachem® y como cátodo uno de acero inoxidable. El oxígeno se inyectó en la zona catódica mediante un concentrador de oxígeno AEROUS Clean Water Tech y se difundió mediante una piedra porosa. La cantidad de oxidantes electrogenerados a partir de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (0.05 M) se estimó mediante la reacción de Wessler (Ec. 2), dicha concentración se determinó por la ley de Beer-Lambert ( $\epsilon = 26, 303 \text{ L mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) midiendo la absorbancia del trioduro a 352 nm (Tran and P. Drogui, 2012, p. 254).



El  $\bullet\text{OH}$  se cuantificó utilizando cumarina (1 mM) como sonda cuantitativa, la reacción resultó en la formación del aducto fluorescente 7-hidroxicumarina (7-HC), que fue cuantificado por un espectrofotómetro de fluorescencia Agilent Cary Eclipse con una longitud de onda de excitación de 350 nm y longitud de emisión de 456 nm, slit de excitación y emisión de 5 nm.

Para la evaluación de oxidantes, se aplicó un diseño experimental factorial ( $2^3$ ), por duplicado, durante 45 min (Tabla 1).

Tabla 1. Rango experimental y niveles de variables de proceso independientes para la cuantificación de oxidantes.

Variable	Rango experimental	
	(-1)	(+1)
Corriente eléctrica (A)	2	4
Flujo de oxígeno (l/min)	0	0.94
pH inicial (UpH)	4	10

La evaluación de los parámetros de degradación de fenofibrato (concentración inicial de 10 µg/L) en ambos reactores se realizó considerando un diseño factorial fraccionado 2<sup>4-1</sup> con puntos en el centro (Tabla 2).

**Tabla 2. Rango experimental y niveles de variables de proceso independientes para la degradación de fenofibrato.**

Variable	Rango experimental		
	(□1)	(0)	(+1)
Tiempo (min)	10	20	30
Corriente eléctrica (A)	1	2	3
pH inicial (UpH)	4	7	10
Flujo de oxígeno (l/min)	0	0.47	0.94

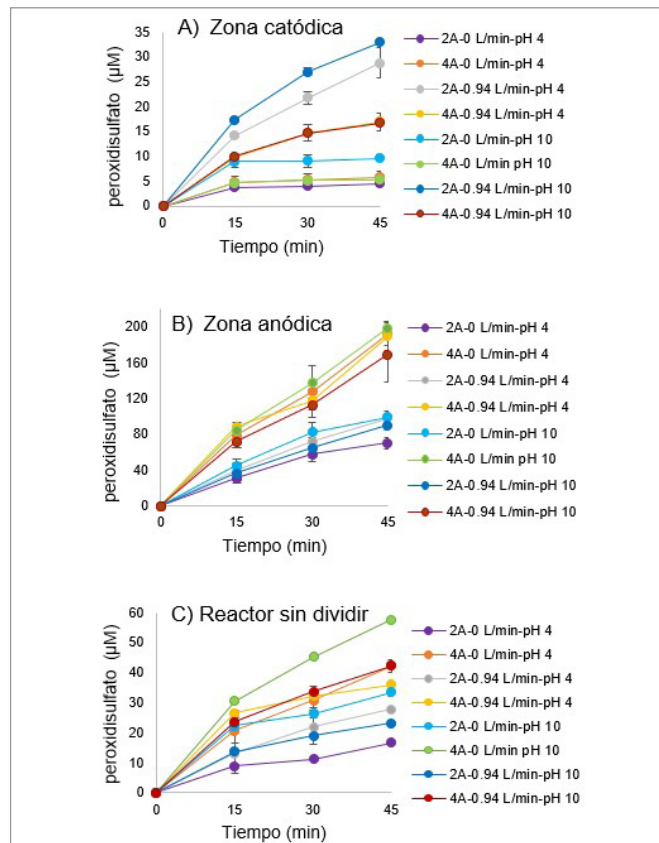
La cuantificación de fenofibrato se realizó usando cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC, por sus siglas en inglés). En un HPLC marca VARIAN modelo ProStar 310 con detector de UV Visible, con una columna Eclipse XDB-C18, Agilent (4.6 x 150 mm) y un volumen de inyección

de 20 µL. Como fase móvil se utilizó una mezcla de Acetonitrilo: Metanol: Agua (50:40:10). Los cromatogramas se obtuvieron a 285 nm. El tiempo de análisis por muestra fue de 13 min. Previo a la cuantificación por HPLC, las muestras pasaron por un proceso de extracción en fase sólida para concentrar las muestras.

### B) Resultados

En la figura 1A y 1B se observa la cuantificación de peroxidisulfato en la zona catódica y anódica del reactor dividido a través del tiempo. Se determinó una concentración máxima de peroxidisulfato de 32.98 µM y 198.65 µM respectivamente. La concentración de peroxidisulfato en la zona catódica estuvo influenciada por la adición de oxígeno, seguido de la corriente eléctrica. Mientras que, en la zona anódica, el aumento de la concentración de peroxidisulfato fue directamente proporcional a la corriente eléctrica, el oxígeno y el pH inicial no tuvieron un efecto significativo. Por otra parte, en la figura 1C se observan los resultados para el reactor sin dividir, en donde se generaron hasta 57.61

Figuras 1A, 1B y 1C.

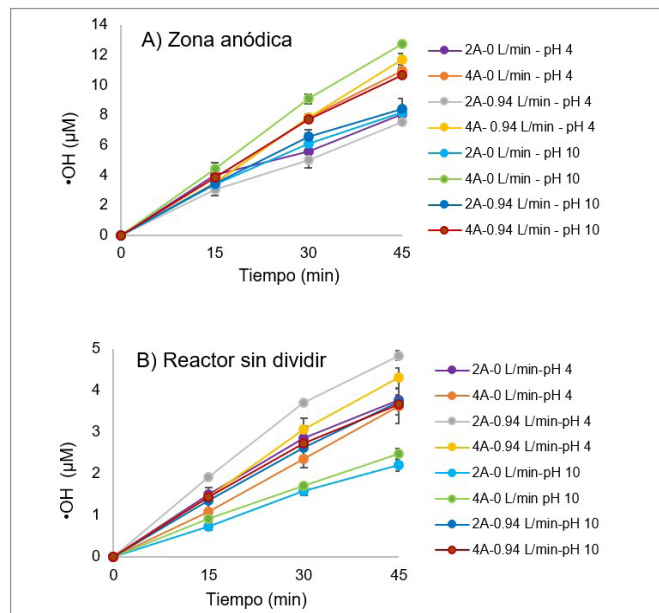


µM de peroxidisulfato. La corriente tuvo el mayor efecto en la producción de peroxidisulfato, seguido por el efecto del pH inicial.

En la figura 2A se observa la producción de •OH en la zona anódica, se observa que esta es influenciada principalmente por la corriente eléctrica, mientras que el O<sub>2</sub>, el pH inicial y algunas interacciones entre ellos tuvieron efectos menores. La cantidad de •OH aumentó con el tiempo, obteniéndose hasta 13 µM. Mientras que su producción máxima en el reactor sin dividir fue de 5 µM (figura 2B); en la figura se observa que la producción de •OH estuvo influenciada por el pH inicial y la inyección de O<sub>2</sub>. En la zona catódica del reactor dividido el pH se vuelve alcalino (> 12), por lo cual el radical •OH se destruye.

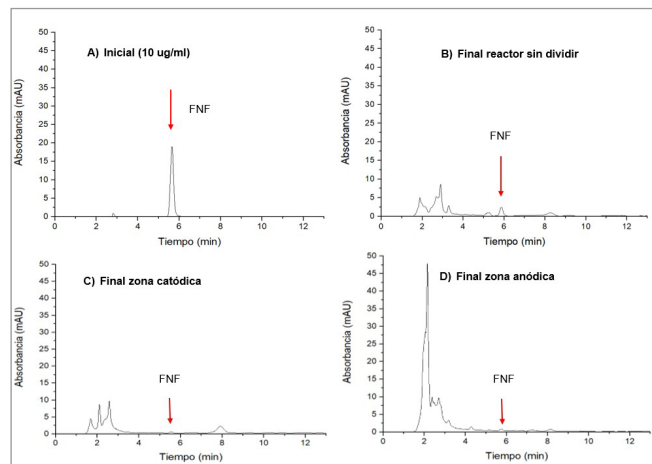
El aumento de peroxidisulfato y de •OH producido por la introducción de la membrana de intercambio aniónico se vio reflejado en el aumento en los porcentajes de degradación de fenofibrato, alcanzándose hasta el 95.29% y 96.55% en la zona anódica y catódica respectivamente, mientras que en el reactor sin dividir solo se alcanzó un 88.43%,

Figuras 2A y 2B.



lo cual se observa en los cromatogramas de la figura 3. En cuanto a la influencia de cada uno de los parámetros, el aumento de la degradación de FNF en la zona anódica estuvo influenciado por la corri-

Figura 3.



ente eléctrica y el tiempo de tratamiento, mientras que en la zona catódica el tiempo de tratamiento y el pH inicial tuvieron mayor influencia, por el contrario, el aumento en la corriente eléctrica y la inyección de oxígeno no muestran un efecto significativo en su degradación. Mientras que, en el reactor sin dividir, el aumento de la degradación de FNF estuvo influenciado por la corriente eléctrica, el

tiempo de tratamiento y la interacción entre la corriente y el tiempo, mientras que el flujo de oxígeno y el pH inicial no mostraron influencia significativa en la degradación del fármaco.

## Conclusiones

La introducción de la membrana de intercambio aniónico entre la zona anódica y catódica del reactor electroquímico permitió una mayor producción de peroxidisulfato y  $\bullet\text{OH}$ , en comparación con los generados en el reactor sin dividir, mientras que la inyección de  $\text{O}_2$  solo benefició el aumento de peroxidisulfato en la zona catódica del reactor dividido y de los  $\bullet\text{OH}$  en el reactor sin dividir. Así mismo, la introducción de la membrana de intercambio aniónico permitió mayores porcentajes de degradación de fenofibrato en comparación con los obtenidos en el reactor sin dividir, sin embargo, no se observó una influencia significativa en la degradación de fenofibrato al inyectar oxígeno en la zona catódica de ambos reactores. 💧

## Bibliografía

- Anglada, A., Urriaga A. and Ortiz I. (2009) Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: fundamentals and review of applications. *J Chem Technol Biotechnol*, No.84.
- De Oliveira, M.A., da Silva G.D. and Tacchi Campos, M.S. (2016). Chemical degradation kinetics of fibrates: bezafibrate, ciprofibrate and fenofibrate. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 52.
- Jung, F., Thurn, M., Krollik, K., Gao, G.F., Herin, I., Eilebrecht, E., Emara Y., Weiler, M., Günday-Türelí, N., Türelí, E., Parham, M.J. and Wacker, M.G. (2021). Predicting the environmental emissions arising from conventional and nanotechnology-related pharmaceutical drug products *Environmental Research*.
- Martinez-Huitle, C.A. and Panizza M. (2018) Electrochemical oxidation of organic pollutants for wastewater treatment. *Current Opinion in Electrochemistry*.
- Santos, L.H., Araújo, A.N., Fachini, A., Pena, A., Delerue-Matos, C. and Montenegro, M.C (2010). Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment. *J Hazard Mater*.
- Tran, N. and Drogui, P. (2012). Electrochemical removal of microcystin-LR from aqueous solution in the presence of natural organic pollutants. *Journal of Environmental Management*, No.114.
- Verlicchi P., Aukidy M.A., Zambello E. (2012). Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: removal, mass load and environmental risk after a secondary treatment—a review, *Sci. Total Environ*.

# Impluvium

Publicación digital de la Red del Agua UNAM  
Edición Especial, Tercera Diáspora Hídrica,  
Diciembre 2022  
[www.agua.unam.mx](http://www.agua.unam.mx)



**MEDIO AMBIENTE**  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

