

# Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

Enero - Marzo 2026

ISSN:2683-2607

No. 145

**LOS SEDIMENTOS MARINOS:  
HUELLAS DEL CLIMA EN EL GOLFO  
DE CALIFORNIA**

**ANTIBIÓTICOS EN JAQUE: LA  
AMENAZA INVISIBLE DE  
PSEUDOMONAS AERUGINOSA**

**TETZCOTZINCO: LAS AVES DE LOS  
JARDINES DE NEZAHUALCÓYOTL**



UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
METROPOLITANA

Revista de las divisiones de CBI y CBS



# Contenido

## Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

No. 145 Enero - Marzo 2026

Editorial	3	M. C. Carlos Eduardo Gómez Sánchez Dr. Julio Ernesto Solís Daun	
<i>Los sedimentos marinos: huellas del clima en el Golfo de California</i> Dr. Luis Andrés Guerrero Murcia Dr. Javier Helenes	5	<i>La Química de los Productos Naturales: ¿qué es y para qué nos sirve?</i> Dr. José Antonio Guerrero Analco Dra. Cecilia I. Mayo Montor Dr. Rafael Salgado Garciglia Dr. Juan Luis Momribo Villanueva	65
<i>Antibióticos en jaque: la amenaza invisible de Pseudomonas aeruginosa</i> Lic. Javier Alejandro Delgado Nungaray Ing. Karen Larissa Salinas Núñez Dr. Orfil González Reynoso	10	<i>Más allá de un instante. Memoria y no localidad en cálculo fraccionario</i> Dr. Jesús Enrique Escalante Martínez Dr. Porfirio Toledo	74
<i>Tetzcotzincó: las aves de los jardines de Nezahualcóyotl</i> Dr. Omar Suárez García Biól. Kathia Ximena Estrella Chávez Biól. Gabriel Alejandro Flores Páez Biól. Damaris Galilea Villegas Lara Dr. Fernando Salgado Mejía Dr. Pablo Corcuera	19	<i>Emergencia silenciosa: aumento de la violencia familiar en mujeres en la Ciudad de México durante la pandemia COVID-19</i> Alejandra Galindo Cruz M en C. María de la Luz Sevilla González Esp. Medicina Forense Erika Santana Hernández	81
<i>Sensor-Exprés para determinar la Calidad del Agua Potable</i> Dr. Eugenio Gómez Reyes Dra. Elia Velázquez Mejía Ing. Donaciano Jiménez Vázquez Dr. Nikola Batina Skeledzija Dr. Antonio Rodrigo Abad Sánchez Dr. Roberto Martín Constantino Toto	27	<i>Lucía del Pozo</i> Lilith GM	92
<i>Coeistencia humanos-mamíferos silvestres: manejo integral y participación social</i> L.D.S. Flor Edith Hernández Jacinto Dra. en C. A. y R.N. Yuriana Gómez Ortiz Dr. en C. A. y R.N. Hublester Domínguez Vegaómez Ortiz Dr. en C. A. y R.N. Leroy Soria Díaz	40	<i>Nanotecnología al rescate del agua: innovación en el tratamiento de aguas residuales</i> Mtra. Gerdany Zúñiga Verdugo Dra. Mirella Gutiérrez Arzaluz Dra. Alejandra Montserrat Navarrete López Dra. Mónica Liliana Salazar Peláez	95
<i>Oscilaciones sostenidas en cultivos: modelos simples, efectos reales</i> Dra. Martha Álvarez Ramírez	49	<i>Estudios de posgrado: Una inversión para el desarrollo profesional del Ingeniero de Software</i> Dr. Alan Ramírez Noriega Dr. Juan Francisco Figueroa Pérez Dr. Manuel de Jesús Rodríguez Guerrero Dr. Yobani Martínez Ramírez	108
		<i>Reciclando cosas raras</i> Dra. Astrid Delfina Toache Perez	115

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería  
en la WEB

Lea los artículos publicados en  
<https://contactos.izt.uam.mx>

*Rector General*

Dr. Gustavo Pacheco López

*Secretaria General*

Dra. Esthela Irene Sotelo Núñez

## UNIDAD IZTAPALAPA

*Rectora*

Dra. Edith Ponce Alquicira

*Secretario*

Dr. Javier Rodríguez Lagunas

*Director de la División de Ciencias  
Básicas e Ingeniería*

Dr. Román Linares Romero

*Directora de la División de Ciencias  
Biológicas y de la Salud*

Dra. Edith Arenas Ríos

## Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería:

Consejo Editorial:

Dra. Edith Ponce Alquicira

Dr. Javier Rodríguez Lagunas

Dr. Román Linares Romero

Dra. Edith Arenas Ríos

*UAM- Iztapalapa*

*Editora en Jefe:*

M. C. Alma Edith Martínez Licona

*Asistente Editorial:*

Ing. Gabriela López Rodríguez

*Comité Editorial por CBS:*

Dra. Laura Josefina Pérez Flores, Dr. Pedro

Luis Valverde Padilla

*Por CBI:*

Dr. Hugo Ávila Paredes

*Por la Universidad Iberoamericana:*

Mtro. Adolfo G. Fink Pastrana

## CONTACTOS, REVISTA DE EDUCACIÓN EN CIENCIAS E INGENIERÍA.

3<sup>a</sup> Época, No. 145, Enero - Marzo 2026, es una publicación trimestral de la Universidad Autónoma Metropolitana a través de la Unidad Iztapalapa, División de Ciencias Básicas e Ingeniería y División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Av. Prolongación Canal de Miramontes 3855, Col. Rancho los Colorines, Alcaldía Tlalpan, C.P. 14386, México, Ciudad de México y Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1a Sección, Iztapalapa, Cd. de México. C.P. 09310, Edificio T144, Tel. 5804 – 4600. Ext. 1144. Página electrónica de la revista: <https://contactos.izt.uam.mx/> y dirección electrónica: [cts@xanum.uam.mx](mailto:cts@xanum.uam.mx) Editora responsable MC Alma E. Martínez Licona. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo de Título No. 04-2023-061914482700-102, ISSN 2683-2607, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Mtra. Alma E. Martínez Licona; Unidad Iztapalapa, División de CBI y CBS; fecha de última modificación 31 de Marzo de 2026. Tamaño del archivo 63.8 MB.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Fecha de Publicación:

Enero - Marzo 2026.

Los artículos publicados en **Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería** son sometidos a arbitraje; para ello se requiere enviar

el trabajo en Word a <https://contactos.izt.uam.mx/>

**Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería,**

UAM – Iztapalapa, T144, Tel. 5804-4600. Ext. 1144

Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186. C.P. 09310

e-mail [cts@xanum.uam.mx](mailto:cts@xanum.uam.mx)

## Editorial

En estas páginas hay un poco de todo, y justamente ahí está su riqueza. Pasamos del fondo del mar a los laboratorios, de ecuaciones y modelos, a jardines con historia, y de ahí a realidades sociales que forman parte de nuestra vida diaria. Los sedimentos del Golfo de California nos ayudan a entender cómo ha cambiado el clima; las bacterias resistentes nos ponen frente a un desafío urgente para la salud; y las tecnologías para vigilar y sanear el agua nos muestran que la investigación puede traducirse en soluciones concretas.

También hablamos de cómo convivir mejor con la fauna silvestre, de lo que las matemáticas pueden revelar sobre procesos agrícolas y de cómo la química de productos naturales, junto con ideas creativas de reciclaje, abre caminos hacia formas más responsables de producir y aprovechar recursos. En ese panorama, el posgrado en ingeniería de software se presenta como una apuesta estratégica para fortalecer el desarrollo tecnológico.

Hay, además, espacio para reflexionar sobre lo que nos toca más de cerca: la memoria, el arte y el aumento de la violencia familiar durante la pandemia nos recuerdan que la ciencia siempre está ligada a las circunstancias sociales en las que surge.

Al final, más que reunir temas distintos, esta edición busca tender puentes y generar diálogo. Porque comprender mejor nuestro entorno es una manera de empezar a cambiarlo.

Atentamente

*MC Alma E. Martínez Licona*

**Editora en Jefe, Revista Contactos**



## Información para autores

**Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería**, Revista dirigida a profesores y a estudiantes de estas disciplinas. Está registrada en el índice de revistas de divulgación de Conacyt, así como en Latindex, Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Para publicar, los trabajos deberán ser originales y accesibles a un público amplio con formación media superior o universitaria pero no especializada; los temas deberán presentarse en forma clara. Cada colaboración debe incluir figuras, diagramas, ilustraciones, fotografías, etc. (otorgando el crédito correspondiente en caso de no ser original), que hagan más accesible la presentación.

### Las secciones que la constituyen son:

Artículos que presentan temas científicos con enfoques novedosos y accesibles (15 cuartillas).

**1. Divulgación.** Artículos que presentan temas científicos con enfoques novedosos y accesibles (15 cuartillas).

**2. Educación científica.** Enfoques originales en la enseñanza de temas particulares (15 cuartillas).

**3. Artículos especializados.** Reportes breves de investigación, relacionados con una problemática concreta (15 cuartillas).

**4. Crónicas.** Enfoques originales en la enseñanza de temas particulares (15 cuartillas).

**5. Divertimentos.** Juegos y acertijos intelectuales (5 cuartillas).

**6. Noticias breves.** Información de actualidad en el mundo de la ciencia (4 cuartillas).

**7. Los laureles de olivo.** Los absurdos de la vida cotidiana y académica (4 cuartillas). En todos los casos se debe incluir los nombres completos de los autores con su adscripción, dirección, teléfono y dirección de correo electrónico.

### Normas

Las colaboraciones a las secciones 1 a 4 deberán ajustarse a las siguientes normas:

1. Resumen escrito en español e inglés.
2. 4 palabras clave en español e inglés.
3. Cuando se incluya una abreviatura debe explicarse por una sola vez en la forma siguiente: Organización de los Estados Americanos (OEA). . .
4. Cuando se utilice un nombre técnico o una palabra característica de una disciplina

científica deberá aclararse su significado de la manera más sencilla posible.

5. Las citas textuales deberán ir de acuerdo al siguiente ejemplo: En cuanto a la publicación del placebo se asevera que “el efecto placebo desapareció cuando los comportamientos se estudiaron en esta forma“ (Núñez, 1982, p.126).

6. Las referencias (no más de 10) se marcarán de acuerdo al siguiente ejemplo: Sin embargo, ese no es el punto de vista de la Escuela de Copenhague (Heisenberg, 1958), que insiste en...

7. Al final del artículo se citarán las referencias por orden alfabético de autores. Pueden añadirse lecturas recomendadas (no más de 5).

8. Cada referencia a un artículo debe ajustarse al siguiente formato: Szabadváry, F. y Oesper, E., Development of the pH concept, J. Chem. Educ., 41 [2], pp.105 -107, 1964.

9. Cada referencia a un libro se ajustará al siguiente formato: Heisenberg, W., Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science, Harper Torchbook, Nueva York, pp.44-58, 1958.

10. Para páginas electrónicas: dirección (fecha de acceso).

11. Los títulos de reportes, memorias, etcétera, deben ir subrayados o en itálicas.

### Envío y características del artículo

El envío del artículo deberá ser en archivo electrónico, en Word, tipo de letra Times New Roman, tamaño 12 con interlineado sencillo y uso de editor de ecuaciones.

En el caso de ilustraciones por computadora (BMP, JPG, TIFF, etc.) envíelos en archivos por separado. El material es recibido en:

### Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería.

UAM – Iztapalapa, T144,

Información: cts@xanum.uam.mx,

Tel. 5804-4600. Ext. 1144.

Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186.

C.P. 09310

### Arbitraje

El Comité utiliza un sistema de arbitraje anónimo que requiere un mes. Se entiende que los autores no han enviado su artículo a otra revista y que dispondrán de un plazo máximo de un mes para incorporar las observaciones de los árbitros. La decisión final de publicar un artículo es responsabilidad exclusiva del Comité Editorial.

# Los sedimentos marinos: huellas del clima en el Golfo de California

**Dr. Luis Andrés Guerrero Murcia**  
Doctor en Ciencias de la Tierra, CICESE

**Dr. Javier Helenes**  
P.h.D en Geología, CICESE

## Abstract

The seafloor sediments from Alfonso Basin in the Gulf of California are like time capsules that help scientists uncover how the climate has changed over thousands of years. By studying tiny fossilized marine organisms and chemical traces in the mud, researchers found that ocean temperatures and rainfall increased during the Early Holocene —after the last Ice Age. This led to more nutrients flowing into the sea and boosted marine life at the base of the food chain. Interestingly, even though the environment became warmer and wetter, potentially harmful algae didn't grow out of control. This kind of research, carried out by Mexican science institutions, plays a significant role in helping us understand how ocean ecosystems have responded to climate changes in the past. With this knowledge, we can better prepare for what might happen in today's warming world and protect marine biodiversity and coastal fishing communities that depend on healthy oceans.

**Keywords:** Climate change, ocean productivity, Holocene, fossil dinoflagellates.

## Resumen

Los sedimentos marinos del fondo de la Cuenca Alfonso, en el Golfo de California, guardan secretos del clima del pasado. Al estudiarlos, los científicos han podido reconstruir cómo eran las condiciones del océano hace miles de años, especialmente durante una etapa llamada Holoceno Temprano, cuando la Tierra empezaba a calentarse tras la última glaciación. Gracias al análisis de microorganismos fosilizados y de ciertos elementos químicos presentes en el lodo marino, se reveló que en ese periodo aumentaron tanto la temperatura del agua como las lluvias. Esto trajo

más nutrientes al mar y permitió un crecimiento mayor de vida microscópica marina. Aunque se esperaba que estas condiciones provocaran un aumento en organismos tóxicos, no fue así. Este tipo de estudios, realizados en colaboración entre instituciones científicas mexicanas, son clave para entender cómo han reaccionado los ecosistemas en el pasado, lo que a su vez ayuda a prepararnos mejor ante los efectos actuales del cambio climático y proteger la vida marina y las actividades pesqueras.

**Palabras clave:** Cambio climático, productividad oceánica, Holoceno, dinoflagelados fósiles.

## Introducción

El océano es un testigo silencioso del tiempo. En sus profundidades, los sedimentos marinos acumulan registros de los cambios ambientales que han ocurrido durante miles de años. En la Cuenca Alfonso, ubicada en el Golfo de California (México), científicos han estudiado estos depósitos naturales para entender cómo ha variado el clima a lo largo de la historia.

Analizar este tipo de sedimentos es algo complejo, pero como todo proceso de investigación, conlleva una metodología que se resume a la extracción de los sedimentos mediante una herramienta especial del fondo marino, un procesamiento en laboratorio con algunos componentes, tales como ácidos, y un posterior análisis bajo el microscopio, que finalmente arrojará los números de conteos necesarios de estos microorganismos fósiles, para analizarlos con la bibliografía correspondiente y antecedentes necesarios, generando unos resultados que son puestos en una publicación científica como aporte de investigación.

Uno de los principales hallazgos de estas pesquisas es que el Holoceno Temprano, edad de la Tierra entre los 12,000 y 8,200 años, es un periodo que estuvo marcado por un aumento en la productividad marina (medida que se suele usar para decir que hubo muchos microorganismos marinos presentes en un periodo de tiempo definido en el mar) y las precipitaciones. Estos cambios fueron documentados mediante el análisis de microorganismos marinos llamados dinoflagelados (organismo unicelulares fitoplanctónicos), así como de elementos químicos presentes en los sedimentos, como el Carbono Orgánico Total (COT), el hierro (Fe) y el titanio (Ti).

### **Descifrando el pasado a través de los sedimentos**

Se analizaron muestras del núcleo DIPAL IV, una perforación de 5.4 metros de profundidad en el fondo marino de la Cuenca Alfonso. Cada capa de sedimento representa un registro del clima en diferentes épocas. Entre los fósiles encontrados se encuentran los quistes de dinoflagelados, estructuras resistentes de estos microorganismos que permiten reconstruir las condiciones ambientales en las que vivieron.

Existe toda una clasificación sobre su morfología, es decir, las formas de sus quistes y la relación que dicha morfología puede tener con respecto a la manera en cómo se alimentaban cuando estaban vivos en el agua de mar. Algunos de ellos hoy en día, son principalmente autótrofos, es decir, al igual que las plantas que hacen fotosíntesis, éstos también realizan su proceso de nutrición a través del aprovechamiento de la energía solar. Existe otro grupo de los llamados heterótrofos, que como su nombre lo indica, se alimentan de otros microorganismos, que incluso pueden

ser también otro tipo de dinoflagelados. Con este orden de relación entre su morfología y sistema de alimentación, se han podido establecer grupos que han dado pie a la identificación de ciertos géneros e incluso a nivel de especies. A su vez, estas especies han podido ser asociadas por abundancia y diversidad con ciertos tipos de clima, que a su vez pueden estar relacionados con las corrientes marinas, variación de la precipitación (lluvias), cambios en el nivel medio del mar, cambios de temperatura del agua, etc. (Flores-Trujillo, 2009).

Además, la medición de ciertos elementos químicos como el carbono orgánico total (TOC), el Hierro (Fe) y el Titanio (Ti) ayudó a comprender la disponibilidad de nutrientes y la influencia de las lluvias en la zona. Un aumento en el carbono orgánico indica mayor actividad biológica, mientras que la reducción del hierro y el titanio sugiere un incremento en la erosión y el transporte de sedimentos desde la tierra hacia el mar (Mejía-Piña et al., 2016). El análisis de estos elementos se lleva a cabo mediante un procedimiento complejo de laboratorio y que formó parte de una colaboración entre instituciones públicas de educación en México, específicamente entre el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) y la Universidad Autónoma de Baja California (UABC).

### **Resultados clave del estudio**

#### **Aumento de la productividad marina**

Uno de los principales hallazgos fue el incremento en la cantidad de quistes de dinoflagelados durante el Holoceno Temprano. En particular, la especie *Tuberculodinium vancampoe*

(Rossignol, 1962), que prefiere aguas cálidas, se volvió más común. Esto sugiere que la temperatura del océano aumentó y que hubo más nutrientes disponibles para el fitoplancton, lo que favoreció una mayor productividad marina.

### **Cambios en la temperatura y las precipitaciones**

El análisis de los sedimentos reveló que durante la transición del Dryas Reciente (fue un período frío abrupto que ocurrió al final del Pleistoceno, entre aproximadamente 12,900 y 11,700 años atrás. Se caracteriza por un retorno a condiciones glaciales en muchas regiones del hemisferio norte, interrumpiendo el calentamiento progresivo que conducía al Holoceno) al Holoceno Temprano, tanto la temperatura como la cantidad de lluvias aumentaron (Rasmussen et al., 2006). Esto quedó reflejado en una disminución en las concentraciones de Hierro y Titanio, lo que indica una mayor erosión de suelos y el arrastre de sedimentos hacia el mar. Esta condición permitió un aumento en la producción de fitoplancton, el primer eslabón de la cadena alimenticia marina.

### **Estabilidad de especies tóxicas**

A pesar de los cambios ambientales, las especies de dinoflagelados potencialmente tóxicas, como *Gymnodinium catenatum*, no mostraron un incremento significativo en su abundancia. Esto sugiere que el calentamiento climático no necesariamente provocaría un aumento en las floraciones algales nocivas en esta región.

Hoy en día existe una gran cantidad de científicos dedicados a crear un sistema de alerta temprana que permita, entre otras, establecer una predicción, con cierto grado de certidumbre, sobre la

generación de las mareas rojas. Las mareas rojas son también conocidas en el medio científico como Florecimientos Algales Nocivos (FANs), que son los principales causantes de, no solo un cambio a rojo de la coloración del mar, si no de la intoxicación de un gran número de peces. Dicha intoxicación, si bien no necesariamente acarrea la muerte del pez, si lo ubica en una condición de vulnerabilidad en la cadena alimenticia y por supuesto, lo convierte en un candidato no apto para el consumo humano.

Adicionalmente durante estos periodos de FANs, se establece por parte de la secretaría de pesca, una restricción a la actividad pesquera, lo que trae como consecuencia pérdidas económicas a los pobladores de pesca artesanal que viven en la regiones cercanas a la Cuenca Alfonso en el sur del golfo de California. Por esta razón, el trabajo del que aquí hacemos mención es un trabajo que contribuye, como antecedente científico, al sistema de alerta temprana que se pretende crear para el control y monitoreo de las mareas rojas.

### **Implicaciones para el futuro**

Comprender cómo el clima ha cambiado en el pasado nos ayuda a predecir cómo responderán los ecosistemas marinos ante el calentamiento global actual. Durante el Holoceno Temprano, el océano fue capaz de adaptarse a los cambios en temperatura y precipitación sin generar impactos negativos en las especies marinas. Sin embargo, hoy en día, factores adicionales como la contaminación y la actividad humana pueden alterar este equilibrio.

El estudio de los sedimentos marinos en la Cuenca Alfonso proporciona información valiosa para el desarrollo de modelos ambientales que ayuden a

anticipar los efectos del cambio climático en los océanos. La conservación de estos ecosistemas es clave para garantizar la estabilidad de la biodiversidad marina en el futuro.

### Conclusión

El análisis de los sedimentos en la Cuenca Alfonso ha permitido reconstruir la historia climática del Holoceno Temprano y revelar tendencias importantes:

1. Mayor productividad marina: La evidencia sugiere que el Golfo de California experimentó un aumento en la actividad biológica gracias a condiciones más cálidas y húmedas.

2. Aumento de temperatura y lluvias: El incremento en las precipitaciones favoreció el transporte de nutrientes hacia el mar, lo que benefició la vida marina.

3. Estabilidad de especies tóxicas: A pesar de los cambios climáticos, las especies de dinoflagelados potencialmente tóxicas no mostraron un crecimiento descontrolado. Estos hallazgos son esenciales para comprender cómo los ecosistemas marinos pueden responder a los desafíos ambientales actuales. Con esta información, es posible diseñar estrategias más efectivas para la protección de los océanos y la mitigación de los efectos del cambio climático.

Para saber más:

1. Douglas, R., Gonzalez-Yajimovich, O., Ledesma-Vázquez, J., y Staines-Urias, F., Climate forcing, primary production and the distribution of Holocene biogenic sediments in the Gulf of California, *Quat. Sci. Rev.*, 26, pp. 115–129, 2007.

2. Roy, P. D., Quiroz-Jiménez, J. D., Chávez-Lara, C. M., Sánchez-Zavala, J. L., Pérez-Cruz, L. L., y Sankar, G. M., Humid Pleistocene–Holocene transition and early Holocene in sub-tropical northern Mexico and possible Gulf of California forcing, *Boreas*, 43 [3], pp. 577–587, 2014.

3. Staines-Urías, F., González-Yajimovich, O., y Beaufort, L., Reconstruction of past climate variability and ENSO-like fluctuations in the southern Gulf of California (Alfonso Basin) since the last glacial maximum, *Quat. Res.*, 83 [3], pp. 488–501, 2015.


### Referencias

[1] Flores-Trujillo, J. G., Helenes, J., Herguera, J. C., y Orellana-Cepeda, E., Palynological record (1483–1994) of *Gymnodinium catenatum* in Pescadero Basin, southern Gulf of California, Mexico, *Mar. Micropaleontol.*, 73 [1-2], pp. 80–89, 2009.

[2] Mejía-Piña, K. G., Huerta-Díaz, M. A., y González-Yajimovich, O., Calibration of handheld X-ray fluorescence (XRF) equipment for optimum determination of elemental concentrations in sediment samples, *Talanta*, 161, pp. 359–367, 2016.

[3] Rasmussen, S. O., Andersen, K. K., Svensson, A. M., Steffensen, J. P., Vinther, B. M., Clausen, H. B., *et al.*, A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination, *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 111 [D6], 2006.

[4] Rossignol, M., Análisis de polen de sedimentos marinos cuaternarios en Israel II - Sedimentos del Pleistoceno, *Polen y esporas*, 4 [1], pp. 121–148, 1962.

The background is a detailed illustration of several pink, multi-flagellated bacteria with angry facial expressions. They are surrounded by various capsules: some are blue and white, some are orange and white, and some are orange and blue. The bacteria appear to be in a state of conflict with the capsules, with some holding capsules like weapons. The overall scene is set against a light, textured background.

# Antibióticos en jaque: la amenaza invisible de *Pseudomonas aeruginosa*

**Lic. Javier Alejandro Delgado Nungaray**

Candidato a Doctor en Ciencias en Procesos  
Biotecnológicos, Licenciado en Químico Farmacéutico  
Biólogo

**Ing. Karen Larissa Salinas Núñez**

Ingeniera en Alimentos y Biotecnología

**Dr. Orfil González Reynoso**

Doctor of Philosophy in Chemical Engineering

**Abstract**

Bacterial resistance will be one of the leading causes of death in Mexico and around the world. The misuse and overuse of antibiotics have increased the bacterial defense mechanisms, including biofilm formation by *Pseudomonas aeruginosa*. Fortunately, emerging technologies such as CRISPR-Cas enable the precise modification or deletion of specific genes to stop antibiotic resistance.

**Keywords:** bacterial resistance, antibiotics, biofilms, CRISPR-Cas

**Resumen**

La resistencia bacteriana será una de las principales causas de muerte en México y en el mundo. El uso incorrecto de los antibióticos ha incrementado los mecanismos de defensa bacterianos, como la formación de biopelículas por *Pseudomonas aeruginosa*. Afortunadamente, nuevas tecnologías han surgido como CRISPR-Cas, la cual permite modificar o eliminar genes de forma precisa para frenar la resistencia a los antibióticos.

**Palabras clave:** resistencia bacteriana, antibióticos, biopelículas, CRISPR-Cas

Los antibióticos ya no son efectivos para combatir las infecciones bacterianas como solían hacerlo. En los últimos años ha incrementado la resistencia a los antibióticos, es decir, algunas bacterias han desarrollado la capacidad para sobrevivir ante este tipo de medicamentos, los cuales fueron diseñados exclusivamente para combatir a las bacterias (matándolas o deteniendo su crecimiento).

**¿Qué genera la resistencia a los antibióticos?**

La resistencia bacteriana surge tanto por mecanismos propios de las bacterias

como también por factores externos. Dentro de estos últimos, el uso inadecuado de los antibióticos es una de las principales causas de que las bacterias sean resistentes; esto se ve reflejado en la vida diaria cuando una persona está enferma a causa de una infección bacteriana y, a pesar de tomar los antibióticos recetados por un médico, su salud no mejora. Entre los factores que aceleran la resistencia a los antibióticos se encuentran la automedicación, el incumplimiento del tratamiento que el médico recetó (duración y cantidades) y el uso de antibióticos cuando el individuo enfermo no tiene una infección causada por bacterias.

Se estima que para el año 2050 el número de muertes a causa de la resistencia bacteriana llegará hasta los 10 millones por año, superando a lo que actualmente se genera por cáncer. Esta resistencia ha generado que las opciones para el tratamiento de infecciones graves sean escasas, lo que la convierte en una amenaza para la salud a nivel mundial (Figura 1) (Camacho Silvas, 2023).

**¿Por qué los antibióticos ya no funcionan? Las bacterias también quieren sobrevivir**

Los antibióticos no son más que moléculas con la capacidad de matar bacterias, y si bien el uso inadecuado de este tipo de medicamentos ha incrementado la resistencia bacteriana, es importante no perder de vista que la vida siempre encuentra nuevos caminos para sobrevivir.

A través del tiempo, las bacterias han desarrollado mecanismos para resistir y no morir ante los antibióticos (Figura 2). De acuerdo con Darby et al. (2023) algunos de estos mecanismos son:

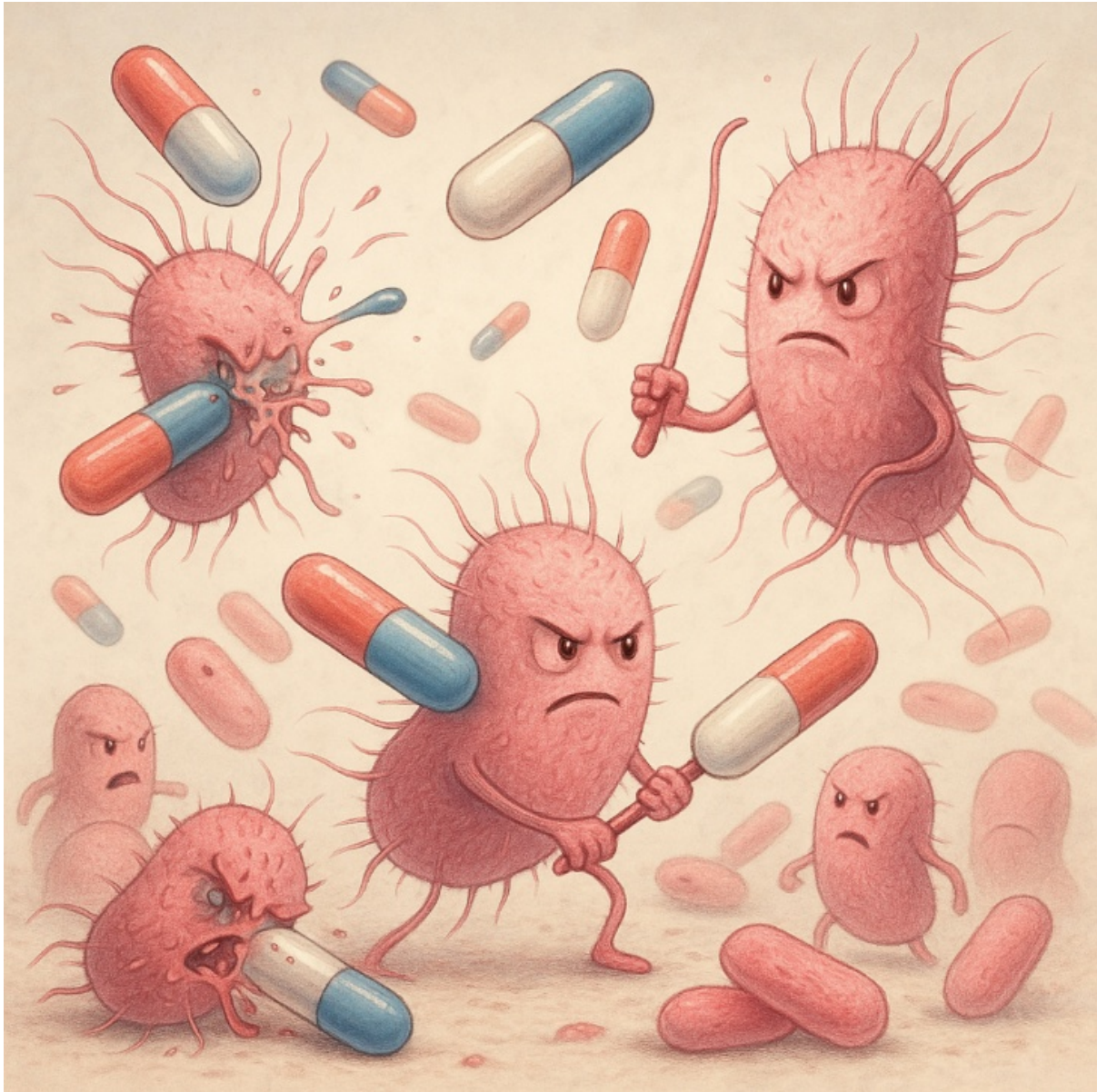


Figura 1: Ineficacia de los antibióticos ante las bacterias. Elaboración propia.

**A) Limitar la entrada del antibiótico:** las bacterias pueden reducir el número de porinas (es decir, las “puertas” por las que ingresa el medicamento). Si no entra, no hace daño.

**B) Modificar las “puertas” de entrada:** cuando el antibiótico necesita entrar por un acceso específico, la bacteria cambia la forma de estas “puertas” para impedir su ingreso.

**C) Inactivar el antibiótico**

**mediante enzimas:** algunas bacterias han desarrollado enzimas (pequeñísimas máquinas moleculares) capaces de romper o modificar la molécula de un antibiótico, anulando por completo su efecto.

**D) Bloquear el sitio de acción del antibiótico:** si colocaras una llave incorrecta en una cerradura, impediría que la llave que sí la abre pudiera abrirla, ¿cierto? Pues la bacteria puede hacer que se ocupe el lugar donde el

antibiótico actúa (sitio de acción) y que de esta forma el antibiótico no funcione.

**E) Modificar el sitio de acción:** si el antibiótico necesita unirse al sitio de acción, la bacteria puede modificar su estructura. Aunque el antibiótico llegue, no se podrá unir y, por lo tanto, no tendrá un efecto.

**F) Expulsar el antibiótico:** cuando el antibiótico ha entrado a la bacteria, esta puede utilizar bombas de eflujo (mecanismo para sacar moléculas de su interior) para expulsarlo antes de que pueda actuar.

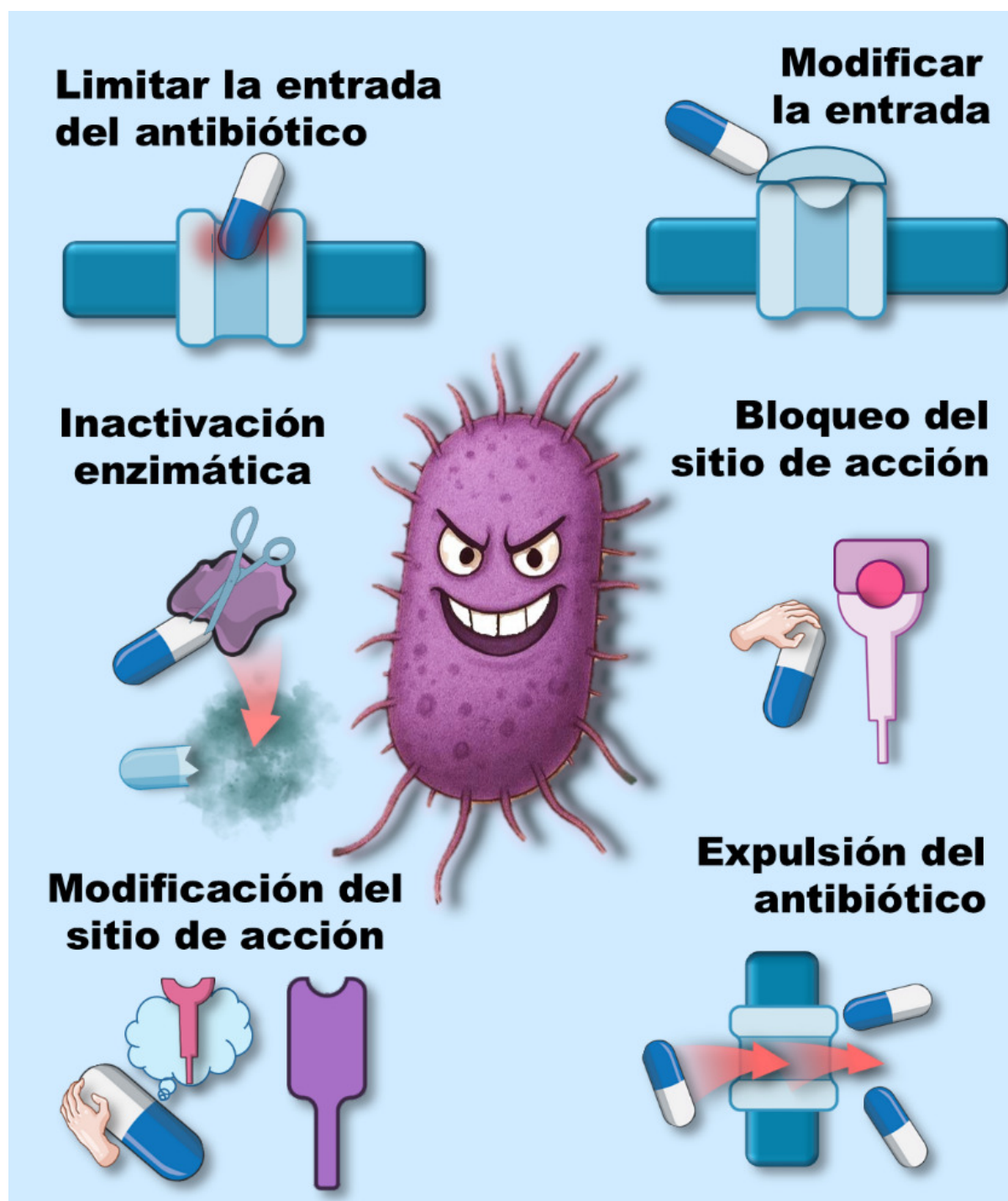


Figura 2: Mecanismos de resistencia a los antibióticos de las bacterias. Elaboración propia.

## **Del hospital a la resistencia bacteriana: *Pseudomonas aeruginosa***

En los últimos años, la resistencia bacteriana se ha convertido en una problemática creciente, tanto a nivel global como en México. En los hospitales, diversas bacterias causan infecciones asociadas a la atención de la salud (IAAS), dentro de las cuales las más comunes incluyen la neumonía asociada a la ventilación mecánica y las infecciones asociadas a catéteres, siendo los adultos mayores de 60 años y los recién nacidos los grupos más vulnerables (Secretaría de Salud, 2023).

Entre las bacterias responsables de estas infecciones, *Pseudomonas aeruginosa* (*P. aeruginosa*) destaca por su peligrosidad. Esta se encuentra entre las dos bacterias patógenas (aquellas que causan enfermedades) con mayor impacto en México. Entre los Estados con mayor índice de IAAS se encuentran Jalisco, Ciudad de México y Estado de México. Su gran capacidad de adaptación le permite sobrevivir en diversos entornos y que, además, ha incrementado su resistencia a los antibióticos.

*P. aeruginosa* es un patógeno oportunista, es decir, que aprovecha las condiciones vulnerables de las personas para causar infecciones. Afecta principalmente a aquellos con un sistema inmunológico débil (defensas bajas) o personas con enfermedades como neumonía, infecciones urinarias e incluso suele infectar heridas

quirúrgicas (hechas en cirugía).

## **Cuando las bacterias se organizan y protegen: biopelículas**

Además de los mecanismos de resistencia mencionados anteriormente, *P. aeruginosa* tiene la capacidad de comunicarse con otras bacterias de su misma especie mediante señales químicas; a este proceso se le conoce como *quorum sensing*. A través de esta forma de comunicación, las bacterias pueden detectar qué tan densa es su población e incluso evaluar si existen suficientes nutrientes para sobrevivir (Mendhe *et al.*, 2023).

Cuando las condiciones no son favorables para su supervivencia, las bacterias se comunican y agrupan para producir de forma conjunta una capa gelatinosa que las envuelve y protege, formando una estructura estable y muy difícil de eliminar. A este mecanismo de defensa adicional se le conoce como biopelícula (Figura 3).

El problema es que las biopelículas reducen el ingreso de los antibióticos, lo que hace que las bacterias dentro de estas sean hasta mil veces más resistentes a sus efectos. Las biopelículas pueden formarse y crecer sobre prácticamente cualquier superficie, siendo especialmente comunes en catéteres, prótesis, válvulas cardíacas implantadas, así como en heridas quirúrgicas, donde representan un serio desafío para el tratamiento médico.



Figura 3: Biopelícula creciendo en catéter. Elaboración propia.

**Sociedad y avances científicos: nuestra mejor arma** En primer lugar, debemos tener claro que solo un médico está capacitado para recetar este tipo de medicamentos, y que en ninguna circunstancia debemos automedicarnos. Además, es muy importante seguir al pie de la letra sus indicaciones sobre un tratamiento con antibióticos, respetando tanto la duración del tratamiento como las dosis, aunque los síntomas desaparezcan antes. Ser conscientes, como sociedad, de la importancia del uso responsable de estos medicamentos puede marcar la diferencia y ayudar a frenar esta amenaza global.

Aunque la resistencia bacteriana es un problema creciente, no todo está perdido, ya que como sociedad aún estamos a tiempo de cambiar el rumbo. Ya hemos visto cómo las bacterias han desarrollado mecanismos complejos para protegerse del efecto de los antibióticos, y cómo el uso inadecuado de estos medicamentos ha contribuido al aumento significativo de la resistencia bacteriana. Cada persona puede aportar su "grano de arena" adoptando medidas simples pero necesarias, como el uso responsable de los antibióticos.

¿Y la ciencia qué puede hacer por nosotros? En los últimos años, la ciencia ha permitido generar nuevas herramientas para combatir la resistencia a los antibióticos. Sabemos que los patógenos, como *P. aeruginosa*, tienen en su interior toda la información que los define: su material genético, conocido como ADN (ácido desoxirribonucleico), en el que, además de encontrarse su "identidad", también están presentes los genes que las vuelven peligrosas. Si se conoce esta información a detalle, existen avances científicos que nos permiten intervenir modificando estas instrucciones o eliminándolas según lo

que necesitamos.

Uno de los avances más revolucionarios en los últimos años es la biología sintética, una disciplina que combina biología, química, genética, informática e ingeniería para diseñar y modificar organismos vivos. Dentro de esta área, CRISPR-Cas9 (herramienta de ingeniería genética) ha destacado como uno de los mayores avances de las últimas décadas. Se trata de una especie de "tijeras moleculares" que permiten cortar, eliminar o insertar fragmentos específicos de ADN de forma rápida, y además muy precisa (Figura 4) (Muñoz-Miranda *et al.*, 2019).

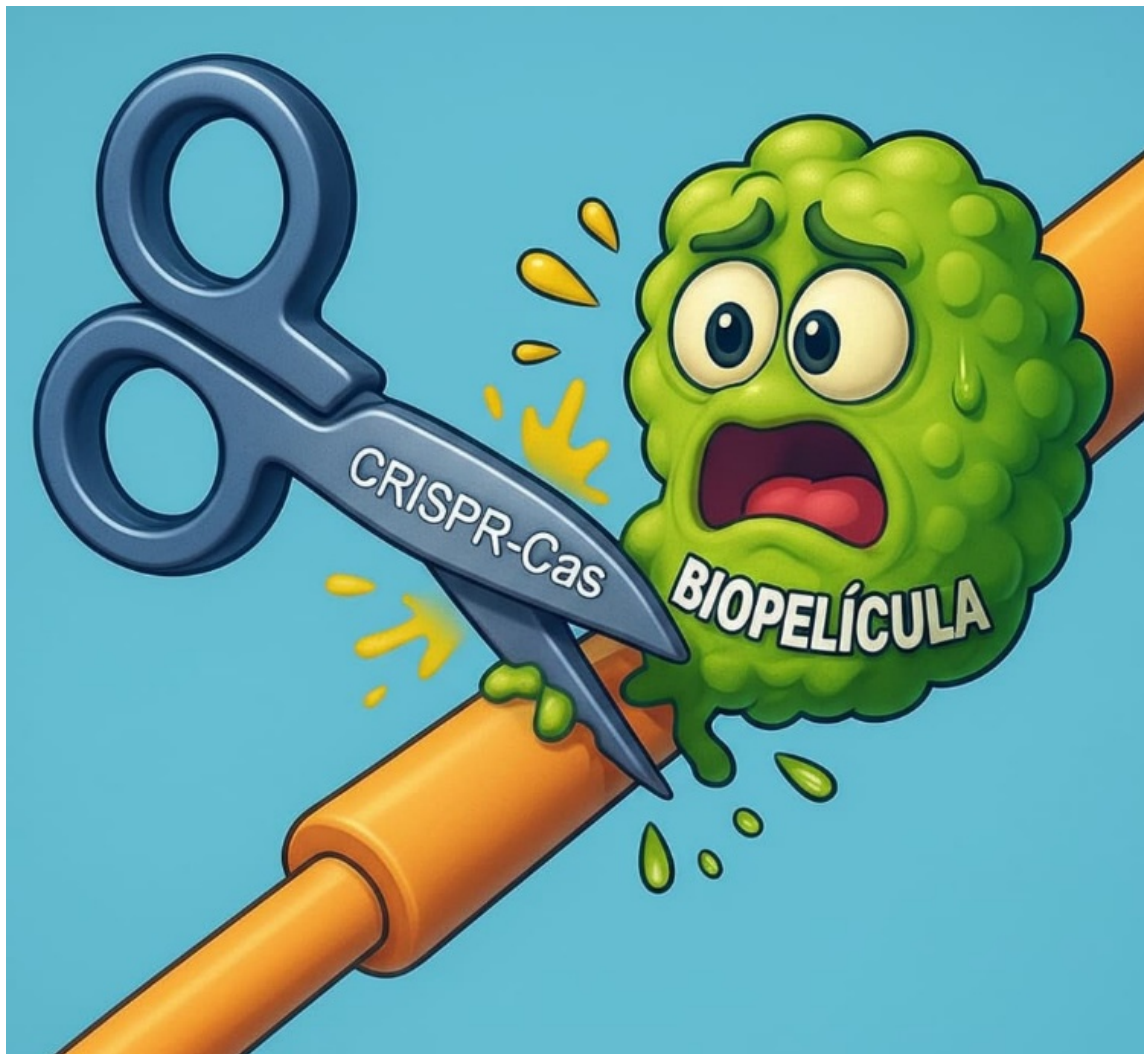


Figura 4: CRISPR-Cas como herramienta de ingeniería genética para la eliminación de biopelículas. Elaboración propia.

El avance en el desarrollo de tecnologías como CRISPR-Cas9 nos abre la posibilidad de dirigir intervenciones sobre los genes asociados a los mecanismos de resistencia bacterianos, así como también a aquellos que le permiten la formación de las biopelículas. Al eliminar estos genes de forma precisa, es posible restaurar la eficacia de los antibióticos y mejorar el manejo de infecciones causadas por *P. aeruginosa*, especialmente en ambientes hospitalarios (Kim *et al.*, 2021).

Ya se han mencionado los avances actuales científicos como CRISPR-Cas y su efectividad para combatir la problemática de la resistencia bacteriana, pero ¿y si cambiamos el enfoque? En lugar de dirigir nuestros esfuerzos para intentar destruir a la bacteria (lo cual en algún punto generará resistencia al nuevo antibiótico), podemos dirigir nuestras “armas” a disminuir aquellas partes que las hacen peligrosas: sus factores de virulencia. Estos factores son los que les permiten a las bacterias causar enfermedades y dañar al paciente. Esta estrategia no solo podría frenar su capacidad de causar infecciones, sino también evitar que desarrolle resistencia, volviéndola más fácil de controlar.

## CONCLUSIONES

Los antibióticos han sido, durante décadas, nuestras mejores armas para combatir a las bacterias como *P. aeruginosa*. Sin embargo, su efectividad ha ido disminuyendo, por lo que tratar las infecciones bacterianas resulta cada vez más difícil. Si no se actúa a tiempo, la resistencia bacteriana se convertirá en una de las principales causas de muerte a nivel mundial en los próximos años. Uno de los factores clave en este problema es el uso inadecuado de

los antibióticos, lo que ha favorecido el desarrollo de nuevos mecanismos de defensa por parte de las bacterias, como las biopelículas, generando mayor resistencia bacteriana. El afrontar esta amenaza no solo debe recaer en la ciencia y los nuevos avances en la tecnología; debemos recordar que, como sociedad, tenemos la oportunidad de contrarrestar esta situación con acciones sencillas pero eficaces, como el uso responsable de los medicamentos y el seguimiento adecuado de los tratamientos.

## Referencias

- [1] Camacho Silvas, L. A. (2023). Resistencia bacteriana, una crisis actual. *Revista Española de Salud Pública*, 97(e202302013).
- [2] Darby, E. M., Trampari, E., Siasat, P., Gaya, M. S., Alav, I., Webber, M. A., & Blair, J. M. A. (2023). Molecular mechanisms of antibiotic resistance revisited. *Nature Reviews Microbiology*, 21(5), 280–295. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00820-y>
- [3] Kim, S., Ji, S., & Koh, H. R. (2021). CRISPR as a diagnostic tool. *Biomolecules*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/biom11081162>
- [4] Mendhe, S., Badge, A., Ugemuge, S., & Chandi, D. (2023). Impact of Biofilms on Chronic Infections and Medical Challenges. *Cureus*. <https://doi.org/10.7759/cureus.48204>
- [5] Muñoz-Miranda, L. A., Higuera-Ciapara, I., Gschaedler-Mathis, A. C., Rodríguez-Zapata, L. C., Pereira-Santana, A., & Figueroa-Yáñez, L. J. (2019). Brief description of Synthetic

- Biology and the importance of its relationship with other disciplines. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomedica*, 40(1). <https://doi.org/10.17488/RMIB.40.1.9>
- [6] Secretaría de Salud. (2023). Boletín Infecciones Asociadas a la Atención de la Salud (IAAS). *Red Hospitalaria de Vigilancia Epidemiológica (RHOVE)*. México.

# Tetzcotzinco: las aves de los jardines de Nezahualcóyotl

**Dr. Omar Suárez García**

**Biól. Kathia Ximena Estrella Chávez**

**Biól. Gabriel Alejandro Flores Páez**

**Biól. Damaris Galilea Villegas Lara**

**Dr. Fernando Salgado Mejía**

**Dr. Pablo Corcuera**

Departamento de Biología, Universidad Autónoma  
Metropolitana Unidad Iztapalapa

### Summary

Birds have inspired humans since the beginning of civilization. This has been so in Texcoco, Mexico, where the pre-Columbian inhabitants built a ceremonial center at the top of a hill, which now remains as an archaeological site and ecological reserve. We visited Tetzcotzinco to study the bird community and to document the bird sounds, especially those of the Black-chinned Sparrow. We registered the existence of several birds which are important in terms of functional ecology and as providers of ecosystemic services.

**Keywords:** Ornithology, Valley of Mexico, bioacoustics, ecology

### Resumen

Las aves han inspirado a los humanos desde los inicios de la civilización. Así ha sido en Texcoco, México, en donde los habitantes prehispánicos construyeron un centro ceremonial en la cima de un cerro, que ahora existe como un sitio arqueológico y reserva ecológica. Visitamos Tetzcotzinco para estudiar la comunidad de aves y documentar sus sonidos, especialmente los del gorrión barba negra. Registramos la existencia de varias aves que son importantes en términos de ecología funcional y como proveedoras de servicios ecosistémicos.

**Palabras clave:** Ornitología, Valle de México, bioacústica, ecología

Las aves han sido, desde siempre, una gran inspiración para los seres humanos. Presentes en la pintura, la música y la literatura, los animales emplumados han sido parte de numerosos relatos, cuentos y poemas a través de la historia. Además, mediante sus roles ecológicos, han provisto a la humanidad de diferentes servicios que contribuyen a su bienestar. Reflexionamos lo anterior

a medida que subimos en una mañana fría al cerro Tetzcotzinco para realizar nuestros estudios ecológicos sobre aves (Figura 1).

Tetzcotzinco es un cerro localizado en el oriente de la cuenca de México, en el municipio de Texcoco, Estado de México, a una altitud de unos 2,353 metros sobre el nivel del mar. En Tetzcotzinco, la temporada de lluvias va de junio a octubre, con un clima templado subhúmedo, temperatura media de 15 °C y precipitación de unos 800 mm anuales (Montufar-López y García-García 2001). En un sentido arqueológico, Tetzcotzinco es relevante debido a que fue el lugar en donde Nezahualcōyotl, el más ilustre gobernante acolhua, edificó un templo dotado con esculturas, escalinatas e infraestructura hidráulica que además contaba con un jardín botánico y un aviario. Dicho sitio, conocido en la actualidad como “los baños de Nezahualcōyotl”, fue edificado en el siglo XV de nuestra era, en el periodo posclásico de la época prehispánica, justo antes de la llegada de los conquistadores españoles.

El cerro también es interesante porque su tipo de vegetación característica es lo que técnicamente se denomina matorral xerófilo (Figura 2), es decir, un ecosistema dominado por plantas de baja estatura adaptadas a condiciones de sequedad. Ahí viven una gran cantidad de especies vegetales nativas, como los encinos, los agaves y las siemprevivas; estas últimas tienen ese nombre común porque acumulan agua en sus tejidos para soportar las épocas más secas, por lo que se ven verdes todo el año. También, el matorral xerófilo de Tetzcotzinco es hogar de una gran cantidad de especies de fauna silvestre, como el cacomixtle, la lagartija espinosa de collar (Figura 3) y el carismático

lagarto cornudo, lo que le ha valido ahí para estudiar a las aves. ser considerado como reserva ecológica estatal. Sin embargo, nosotros estamos



Figura 1: Estudiantes de biología realizando avistamientos de aves en el cerro Tetzcotzinco.



Figura 2: Matorral xerófilo en el cerro Tetzcotzinco.



Figura 3: Lagartija de collar (*Sceloporus torquatus*) en Tetzcotzinco.

Justo antes de la salida del sol, las aves cantan vigorosa y simultáneamente, en un fenómeno conocido como coro del amanecer (Gil y Llusia 2020). Entre las aves que distinguimos por los cantos matinales que emiten tenemos al picogordo tigrillo (Figura 4), al colibrí oreja violeta y al gorrión barba negra. Especialmente llamativo es el canto de este último, el cual consiste en

tres partes, una sección introductoria formada por un par de notas cortas, una parte intermedia compuesta de notas cortas que aceleran progresivamente, y una parte final compuesta por dos o tres notas cortas (Figura 5). Diferentes subespecies del gorrión barba negra viven desde el suroeste de Estados Unidos hasta el centro de México (Pandolfino *et al.* 2022); el canto de la subespecie que vive en el Altiplano Mexicano es distinto al de las otras subespecies.



Figura 4: Macho de picogordo tigrillo (*Pheucticus melanocephalus*).

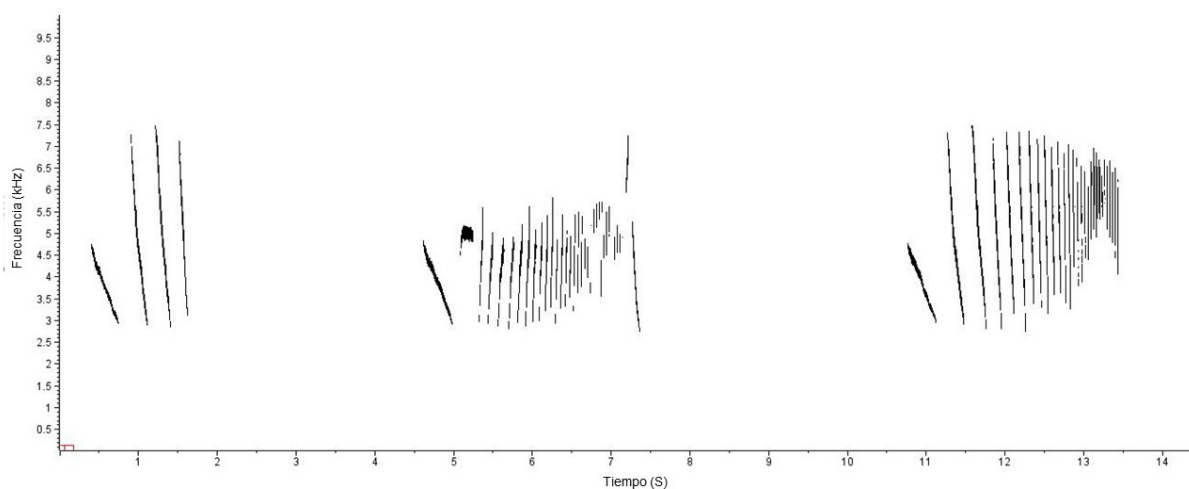


Figura 5: Espectrograma del canto del gorrión barba negra (*Spizella atrogularis*), en donde se aprecian las notas introductorias, una sección intermedia y un trino final, característico de la subespecie que habita el centro de México.

Hablando de bioacústica, en Tetzcotzinco habita un grupo singular de aves que imitan los sonidos de su medio circundante; es el grupo de los mímidos. A dicho grupo pertenecen los cenizontles, a los cuales el ilustre Nezahualcóyotl dedicó un poema, así como el enigmático cuicacoche moteado, ave endémica de las zonas áridas de México y de la cual se sabe poco sobre su biología básica y sus vocalizaciones. Nuestras visitas nos han permitido grabar sus cantos, en los que imita desde otras aves hasta máquinas e incluso mascotas. Entre las explicaciones científicas de la capacidad de estas aves para imitar sonidos, está la relacionada con la selección sexual; esto es que las hembras eligen a machos con una mayor capacidad de imitación vocal (Prum 2018).

Entre las aves que observamos, la más notable, por ser una de las especies más abundantes en la zona, es el jilguero dominico (Figura 6), una colorida ave de tonos amarillos, negros y blancos que busca pequeños frutos en las ramas de los árboles volando en grupos formados

por machos y hembras tanto adultos como juveniles. Nuestras investigaciones se enfocan en la diversidad funcional, es decir, en el estudio de la variedad de los rasgos físicos y de comportamiento que son importantes para el funcionamiento de los ecosistemas (Michel *et al.* 2020). Por ejemplo, al comer frutos, el jilguero dominico traga las semillas de las plantas que los producen, y cuando vuela a otros sitios defeca dichas semillas lejos de donde fueron producidas. Eventualmente, dichas semillas, depositadas en el suelo, germinarán para dar lugar a más plantas, con lo cual el jilguero dominico habrá contribuido con la dispersión de las plantas. Otro servicio ecosistémico que brindan las aves es el de control de plagas: por ejemplo, las rapaces como los cernícalos o los gavilanes (Figura 7) que se alimentan de roedores o de insectos, regulan las poblaciones de sus presas, las cuales se multiplicarían sin control en ausencia de depredadores, por lo que podrían causar daños a plantas, otros animales e incluso al humano.



Figura 6: Macho de jilguero dominico (*Spinus psaltria*).



Figura 7: Cernícalo americano y gavilán de Cooper sobrevolando en el cerro Tetzcotzinco. Estas aves forman parte del grupo de las rapaces diurnas, es decir aves cazadoras activas durante el día

### Conclusión

Tetzcotzinco alberga un pequeño remanente de vegetación nativa rodeado de tierras de cultivo, zonas urbanas, carreteras, pastizales inducidos y bancos de materiales. La biodiversidad del sitio enfrenta amenazas fuertes como la introducción de perros y gatos que cazan fauna silvestre y les transmiten enfermedades, así como pérdida de cobertura vegetal, incendios forestales y quemas clandestinas de desechos peligrosos, altos niveles de ruido y residuos sólidos, y temporadas de sequía cada vez más prolongadas provocadas por el cambio climático. En Tetzcotzinco viven una gran cantidad de aves endémicas y migratorias. Es importante que la gente que visita el sitio sea consciente de estas amenazas y cuide el sitio, valorando la flora y la fauna y mediante la práctica de acciones, como la observación de aves y el senderismo, de bajo impacto ambiental.

### Referencias

- [1] Gil D, Llusia D. 2020. The Bird Dawn Chorus Revisited. In: Aubin, T., Mathevon, N. (eds) Coding Strategies in Vertebrate Acoustic Communication. Animal Signals and Communication, vol 7. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39200-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39200-0_3)
- [2] Montufar-López A, García-García MT. 2001. Arqueobotánica de El Tetzcotzinco. *Arqueología*:129-139.
- [3] Michel NL, Whelan CJ, Verutes GM. 2020. Ecosystem services provided by Neotropical birds. *The Condor* 122:duaa022. <https://doi.org/10.1093/condor/duaa022>
- [4] Pandolfino ER., Douglas LA, Ray C. 2022. Irruptive movements of

the Black-chinned Sparrow. *Western Wildlife* 9:24-37.

[5] Prum RO. 2018. *The evolution of*

*beauty: How Darwin's forgotten theory of mate choice shapes the animal world-and us.* Vintage.

# BIOSENSOR EXPRES PARA AGUA POTABLE

**Sensor-Exprés para  
determinar la Calidad del  
Agua Potable**



**Dr. Eugenio Gómez Reyes**

Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica,  
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa

**Ing. Donaciano Jiménez Vázquez**

Departamento de Ingeniería Eléctrica,  
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa

**Dr. Nikola Batina Skeledzija**

Departamento de Química,  
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa

**Dr. Antonio Rodrigo Abad Sánchez**

Departamento de Procesos y Técnicas de Realización  
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

**Dr. Roberto Martín Constantino Toto**

Departamento de Producción Económica,  
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco

**Dra. Elia Velázquez Mejía**

Departamento de Biotecnología,  
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa



**Tu agua,  
siempre segura**

## Abstract

A device that assess the quality of drinking water is shown. Such device measures the quality parameters that determine the physical (turbidity), chemical (conductivity), bacteriological (fecal coliform) and satisfaction (temperature and pH) condition of drinking water. The instrument can be used by families since it is easy to use, has an immediate response, has a low cost and allows you to know if the water being measured falls within the norm and therefore can be drunk. It stores in memory the date and time of the measurement, as well as the measured water quality parameters and results are compared with the standard. The stored information is transferred by activating a cell phone application, first, to the cell phone itself with the Android system and then it is retransmitted along with the cell phone's GPS position to a server. The user can additionally consult the information with their cell phone application to know the water quality conditions in their location. The device is compact and portable (approximately the size of a cell phone) and is the only probe that measures known drinking water quality parameters of that size and with instantaneous response (1 to 3 seconds), including for the detection of fecal coliforms.

**Keywords:** Drinking water, water quality, measuring device, pollution indicator, detection of *Escherichia coli*.

## Resumen

Se presenta un dispositivo para tener certeza en la calidad del agua potable que se bebe. Este aparato mide los parámetros de calidad que determinan la condición física (turbidez), química (conductividad), bacteriológica (coliformes fecales) y de satisfacción

(temperatura y pH) del agua potable. El instrumento puede ser utilizado por las familias ya que es de fácil uso, de respuesta inmediata, tiene bajo costo y permite saber si el agua que se mide cae dentro de la norma y por tanto se puede beber. Almacena en la memoria la fecha y hora de la medición, así como los parámetros de calidad del agua medidos y el resultado de la comparación con la norma. La información almacenada es transferida mediante la activación de una aplicación de celular, primero, al celular mismo con sistema Android y luego se retransmite junto con la posición GPS del celular a un servidor. El usuario puede, adicionalmente, consultar la información con su aplicación de celular para conocer las condiciones de calidad del agua de su localidad. El dispositivo es compacto y portátil (del tamaño aproximado de un celular) y es la única sonda que mide parámetros de calidad del agua potable conocida de ese tamaño y de respuesta instantánea (1 a 3 segundos), inclusive para la detección de coliformes fecales.

**Palabras clave:** Drinking water, water quality, measuring device, pollution indicator, detection of *Escherichia coli*.

### 1. ¿Cómo sabes que el agua que bebes es potable?

Generalmente, el agua que bebemos es embotellada o de la llave (Figura 1), pero después de haberla pasado por un filtro y/o hervirla.

El agua embotellada consideramos, pero no tenemos certeza de ello, que es agua potable porque ha pasado por procesos de potabilización y que cumple con la norma de calidad del agua potable DOF (2022). Hoy en día, en el mercado hay una variedad inmensa de marcas de agua embotellada que es difícil dar

seguimiento al cumplimiento de la calidad del agua para ser potable, de hecho, nunca le damos seguimiento a ello, solo suponemos que es agua potable de buena calidad, mejor que el agua de llave.



Figura 1: Agua potable para consumo humano.

En principio, el agua de la llave suministrada por los organismos operadores de agua potable, debe ser potable y por tanto debemos de tener confianza para beberla. En efecto, el agua servida mediante la red de agua potable es potable CONAGUA (2018), DOF (2022). Sin embargo, cuando queremos beberla, generalmente la tomamos de agua de la llave de la cocina y es entonces que la garantía de potabilidad se pierde porque generalmente no contamos con suministro de 24 horas continuas y tenemos que acudir a tanques de almacenamiento como tinacos, más aún, si la presión de bombeo por la red no es lo suficiente como para elevar el agua hasta la cocina, entonces, además tenemos que contar con cisternas. En estos depósitos domésticos de almacenamiento de agua potable (tinacos y cisternas), perdemos la garantía de la potabilidad, toda vez que nosotros mismos no tenemos la cultura de dar mantenimiento a estos depósitos para conservarlos libres de contaminación, principalmente bacteriana. ¿Cuál fue la última vez que lavaste tu tinaco? ¿Cuándo lavas tu tinaco, también lo desinfectas? Los filtros domésticos (adheridos a la llave de la cocina) generalmente limpian el agua de impurezas inorgánicas, pero las bacterias pasan libres del filtrado, sobre todo aquellas que no se adhieren a los sólidos en suspensión. Para eliminar las bacterias, se requiere desinfectar el agua, ya sea con temperatura (hervir) o clorarla. En el proceso

de cloración se debe de controlar la concentración de este elemento puesto que forman subproductos que pueden ser potencialmente carcinogénicos, específicamente compuestos orgánico como los trihalometanos.

Es decir, tenemos más incertidumbre que certeza que el agua potable que bebemos es de buena calidad. Tal vez, podemos decir que es de buena calidad porque no tenemos enfermedades gastrointestinales frecuentes Figura 2.

Cuando tenemos estas enfermedades, aludimos más al tipo de alimento consumido que al agua bebible. Sin embargo, para la preparación de los alimentos se supone que se utiliza agua potable, sino es el caso o no se tiene certeza de la potabilidad del agua usada para la preparación de alimentos y lavado de utensilios de cocina, la transmisión micobacteriana se hace mediante el uso del agua Lara & García (2019), Figura 2.

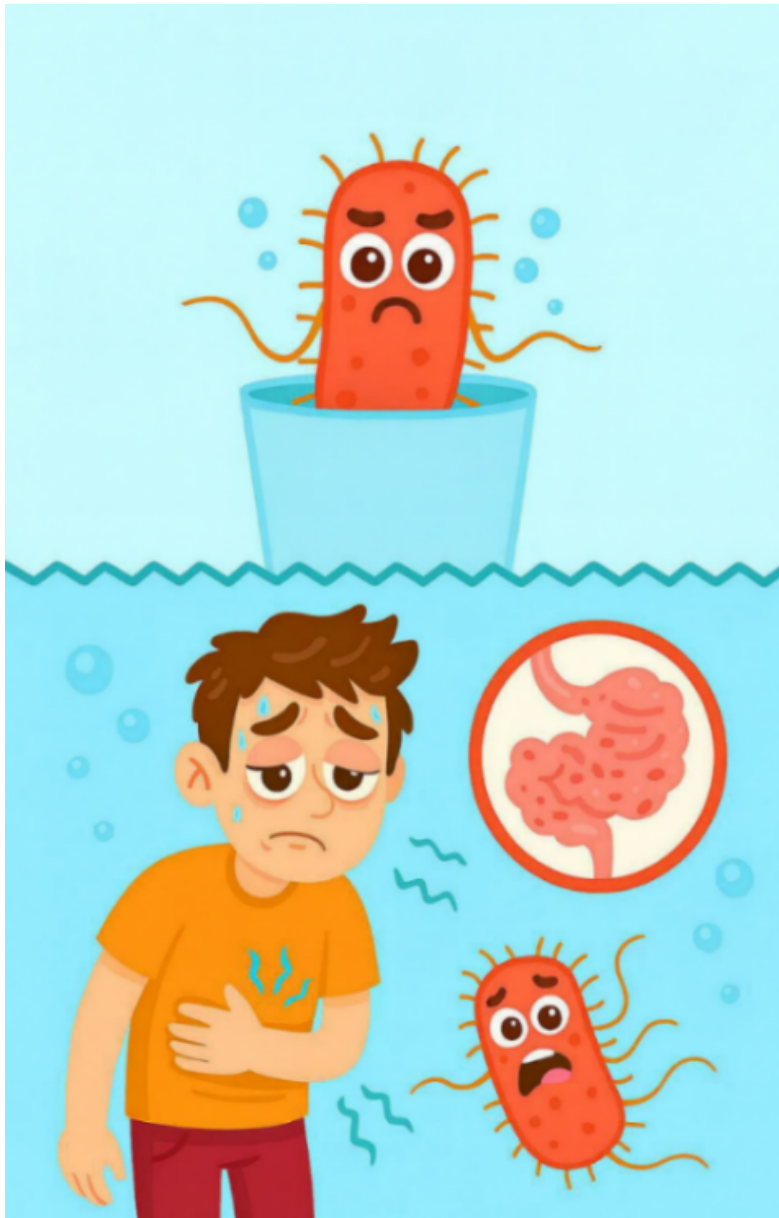


Figura 2: Transmisión de bacterias a través del agua.

## 2. ¿Cómo puedo medir calidad del agua potable?

Para generar confianza en la calidad del agua potable para beberla, tendríamos que recurrir a realizar análisis químicos y bacteriológicos del agua, lo cual resulta caro y tardado, por lo que no es habitual hacerlo. En caso de proceder de esta manera, sería necesario hacer los análisis del agua de manera rutinaria porque la calidad del agua varía y en todo caso, algunos análisis, especialmente los bacteriológicos, requieren de hasta 48 horas para tener resultados (Es decir, para cuando se detecte la presencia de microorganismos patógenos en el agua potable, será demasiado tarde porque 2 días después, los síntomas de salud ya estarían presentes Lara & García (2019); Velázquez (2024).

Otra alternativa con capacidad de realizar mediciones de la calidad del agua *in-situ* y de respuesta inmediata, son las sondas de medición de parámetros de calidad del agua. Sin embargo, las sondas comerciales que existen para el monitoreo en cuerpos

de agua superficiales y subterráneos son extremadamente costosas para los usuarios domésticos, su tamaño y operación no permite su uso en los hogares. Por otra parte, no existen este tipo de sondas que sean compactas como para instalarlas o aplicarlas en sistemas de distribución, recolección y tratamiento de las aguas.

Existen en el mercado dispositivos compactos y portátiles que miden parámetros de calidad del agua de forma inmediata, excepto por la detección de bacterias. Sin embargo, estos dispositivos sólo cuentan por lo general con un sensor para medir un solo parámetro, si acaso también con sensor de temperatura para tener información de corrección de la medición Figura 3. Por lo que se tendría que adquirir varios de estos dispositivos, uno para cada parámetro de medición. Además de lo caro también esta alternativa, limitaría su aplicación rutinaria de las tantas mediciones que se tendría que realizar en un sitio de muestreo.

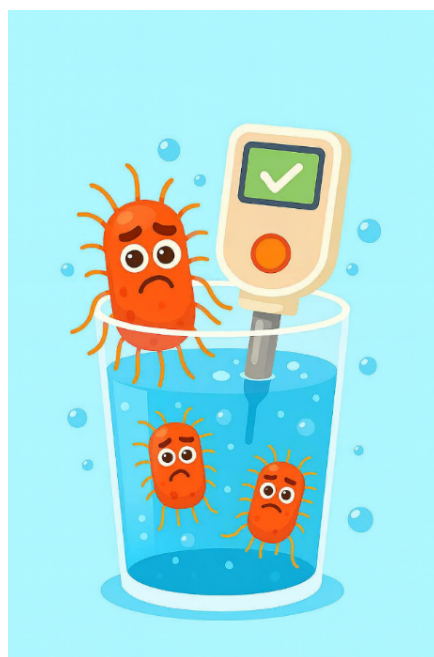


Figura 3: Dispositivos compactos y portátiles.

No existe en el estado de la técnica una alternativa para generar certeza en la calidad del agua potable para beberla que tenga la capacidad de realizar mediciones de su calidad identificando la presencia de *E. coli in-situ* y que proporcione una respuesta en cuestión de segundos (tiempo real). El dispositivo que se describe aquí (Figura. 4) permite dar certeza de manera fácil, rápida y económica sobre la calidad del agua que se consume. Toda vez que se ha parametrizado con los niveles de normalización del agua considerada potable y segura para el consumo humano. Es decir, la calidad del agua potable se establece según los límites permitidos para

algunos parámetros en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, *Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano-Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Esta invención es el resultado del trabajo de investigación multidisciplinario de profesores de la UAM (Universidad Autónoma Metropolitana), donde ha participado personal de las disciplinas en Hidrología, Ingeniería Civil, Nanotecnología, Biotecnología, Geomática, Electrónica, Diseño Industrial, Economía y Sociología Gómez-Reyes *et al.*, 2021, Velázquez (2024).



Figura 4: Dispositivo de medición de la calidad del agua potable.

El dispositivo inventado se utiliza para medir la condición de la calidad de agua que se consume en los hogares toda vez que los sensores que utiliza están miniaturizados y el tamaño del dispositivo no es más grande que un celular; este dispositivo es, por tanto, compacto. Consta solo de un botón de encendido y de un led que si enciende de color verde indica que el agua en medición puede ser bebible toda vez que está libre de coliformes fecales (*E. coli*) y cumple con las condiciones de normatividad de conductividad, turbidez y de pH; de lo contrario se enciende el led en color rojo. Dada estas características del dispositivo, resulta práctico y económico medir la calidad del agua en los hogares en cualquier momento que se requiere, *i.e.*, la condición de la calidad del agua potable puede ser conocida de manera rutinaria e impactará en el cambio de hábito de las personas, sino de consumir agua potable de la llave, a lo menos en conocer la calidad del agua que se está bebiendo Velázquez (2024).

Si bien, la calidad del agua potable es determinada con el análisis de más de 70 componentes disueltas y/o suspendidas en el agua, los parámetros fuera de norma que el dispositivo mide, deben interpretarse como indicar del deterioro de la calidad del agua y que requiere atención y de un análisis más en detalle. Es decir, el dispositivo de medición de la calidad del agua potable es un primer diagnóstico de aviso de la calidad del agua. Por cierto, SACMEX /Sistema de Aguas de la Ciudad de México) ha utilizado esta misma estrategia de medir parámetros representativos de la calidad del agua potable, para darse una primera idea de la potabilidad del agua. En este caso, los parámetros utilizados por SACMEX son los mismos que el dispositivo mide Gómez-Reyes *et*

*al.*, 2021, excepto por el cloro residual (indicación de la desinfección). En nuestro caso es una medida directa de la presencia de coliformes fecales a través de la detección de *E. coli* indicando un posible problema de desinfección.

El tamaño y la portabilidad del dispositivo, aunado al hecho de que emplea baterías recargables, permite que las mediciones que se puedan llevar a cabo identifiquen la calidad del agua suministrada a través del servicio público de distribución de agua potable; incluyendo, las llaves de suministro dentro del hogar. Es decir, no solo sirve para saber si podemos beber el agua de la llave, sino que también para detectar donde pierde calidad de potable el agua si es que no las están sirviendo en los domicilios con esa calidad. Dada su utilidad, el dispositivo puede emplearse como un detector de la calidad del agua en los hogares y de aquella que estamos a punto de beber.

### ***3. ¿Cómo funciona el indicador de la calidad del agua potable para uso doméstico?***

El dispositivo inspecciona la calidad del agua potable, a través de sensores que miden los parámetros de calidad que determinan la condición física (turbidez), química (conductividad), bacteriológica (coliformes fecales) y de satisfacción (temperatura y pH) del agua potable que se bebe. Este instrumento consiste en un sistema central de procesamiento (microcontrolador) que, a partir de una muestra de agua, mide la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica, la turbidez y la presencia de bacterias patógenas (*E. coli*). Con estos parámetros, el microcontrolador compara con el rango de concentración permitido en la norma de agua potable para avisar al usuario, por medio de un led de color verde, si el agua que se

está midiendo cae dentro de la norma y por tanto se puede beber, o de lo contrario con el led es de color rojo. También, almacena en memoria la fecha y hora de la medición, así como los parámetros de calidad del agua medidos y el resultado de la comparación con la norma. La información almacenada es recuperada por medio de un protocolo de comunicación (vía Bluetooth) que permite al dispositivo transferir los

datos mediante la activación de una aplicación de celular, primero, al celular mismo con sistema Android y luego se retransmite junto con la posición GPS del celular a un servidor (Figura. 5). El usuario puede, adicionalmente, consultar la información con su aplicación de celular para conocer las condiciones de calidad del agua de su localidad Rodríguez *et al.*, 2027.

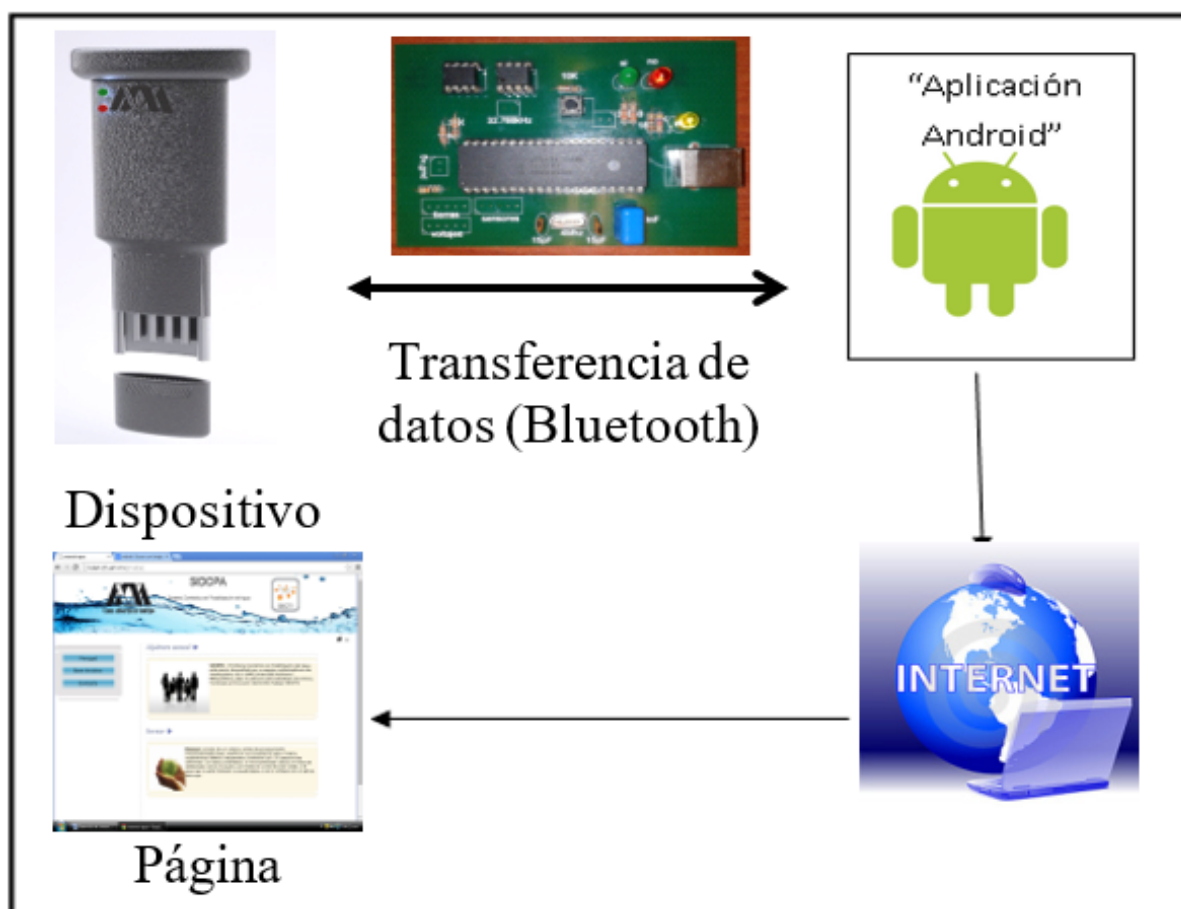


Figura 5: Funcionamiento del dispositivo de medición de la calidad del agua potable.

El dispositivo es compacto y portátil (del tamaño aproximado de un celular) y es la única sonda que mide parámetros de calidad del agua potable conocida de ese tamaño y de respuesta instantánea (1 a 3 segundos), inclusive para la detección de coliformes fecales que las respuestas de los dispositivos más avanzados a la fecha

son de 4 a 8 horas Velázquez (2024).

El dispositivo cuenta con un componente de Bluetooth integrado en su circuito electrónico que le permite transferir los datos medidos. El Bluetooth constituye un elemento del protocolo de comunicación del dispositivo. Los demás

elementos son externos al dispositivo, v.gr., aplicación Android de celular que recibe los datos transmitidos del dispositivo y los transfiere a una base de datos disponibles al servidor de cómputo, en donde son procesados y desplegados a través de un sistema de información geográfico para la consulta del público en una página

web; la consulta de la información también es posible realizarla a través de la aplicación del celular que liga la dirección del servidor para despliegue de datos inmediatamente después de transmitir los datos recibidos del dispositivo (Figura. 5) Gómez-Reyes *et al.*, 2021.

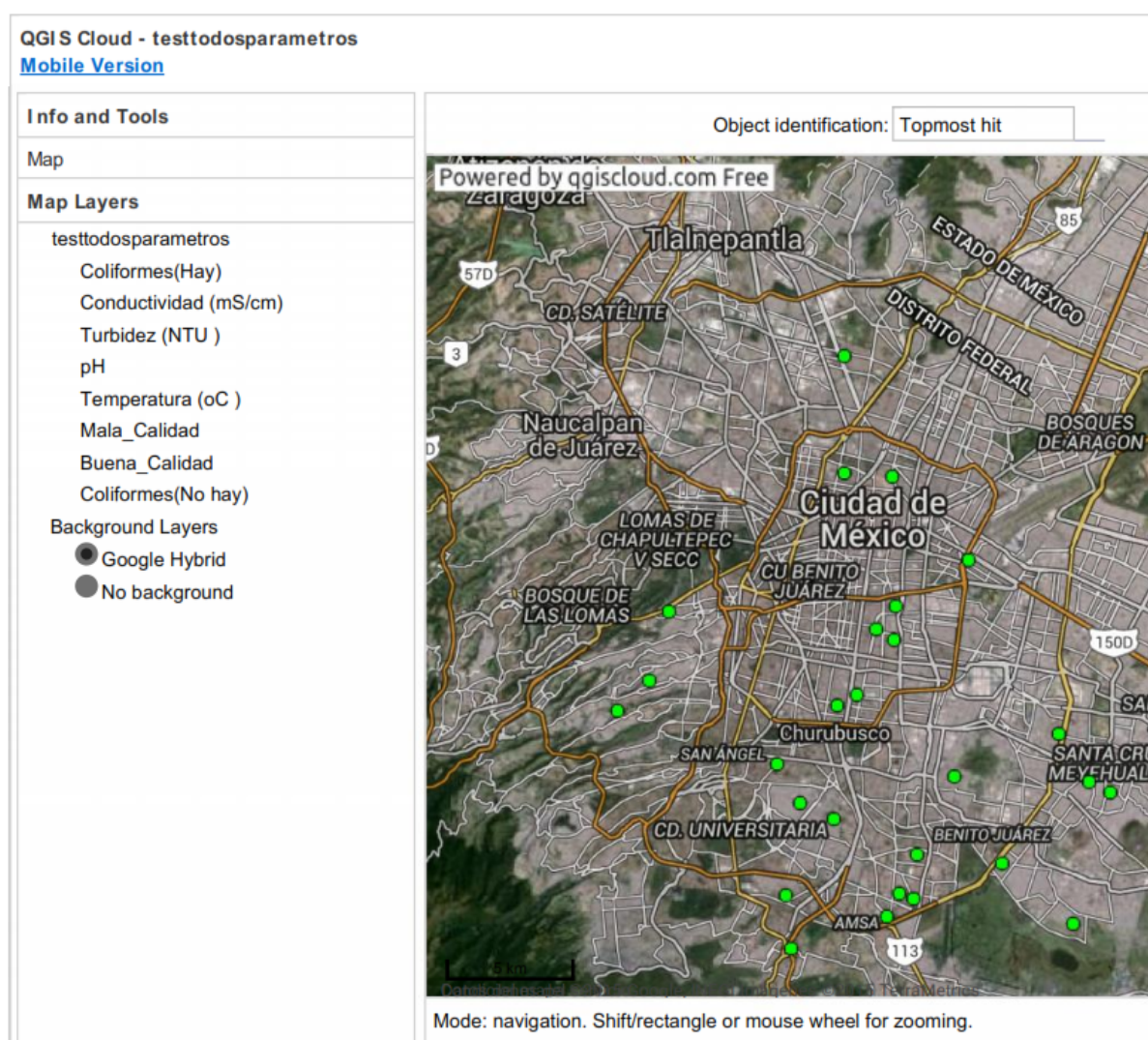


Figura 6: Despliegue de información (Menú Mapas) del dispositivo en el celular, mostrando puntos de buena calidad del agua del agua potable.

El protocolo de comunicación del dispositivo hace la diferencia de este aparato de medición respecto a otros dispositivos comerciales que miden la

calidad del agua de forma separada y que han sido desarrollados con la finalidad de satisfacer un mercado potencial de consumo. El dispositivo

para medir la calidad del agua doméstica es un aparato desarrollado para recabar datos de la calidad del agua en los hogares y poderla utilizar para proporcionar información de las condiciones del agua potable en la ciudad. Es equivalente a contar con una estación de monitoreo de calidad del agua en cada domicilio. Como servicio al usuario, le proporciona de manera instantánea la indicación de poder o no beber el agua de la llave. Pero como servicio a la sociedad, permite mantener al público alerta de las condiciones de calidad del agua potable en sus domicilios, más aún permitirá detectar en tiempo real de una contaminación del agua y evitar daños a la salud por ingerir ese tipo de agua. Será posible también diseñar planes de contingencia por la distribución de la mala calidad del agua potable, sobre todo durante el estiaje, de manera similar como se hace con la calidad del aire.

#### **4. ¿Dónde puedo adquirir el dispositivo para medir la calidad del agua potable?**

Actualmente, el dispositivo existe a nivel de presentación. Se está diseñando la versión industrial para ponerse a disposición al público en general. Después de someterlo a pruebas de control de calidad.

#### **5. ¿Cómo cambiará la cultura del agua con el dispositivo?**

En primer lugar, pasará a formar parte de nuestros hábitos la medición de la calidad del agua potable para generar certeza en lo que se está bebiendo. Algo similar cuando buscamos la fecha de caducidad de un producto antes de adquirirlo. En segundo lugar, la comunidad estará informada de la calidad del agua potable no solo en su hogar, sino que también en la ciudad donde vive. Con la posibilidad de

consumirla de forma directa del grifo de la red de distribución si esta cumple con la calidad para uso y consumo humana. Impactando en el gasto familiar.

#### **6. ¿Qué otros dispositivos están por venir?**

Durante las pruebas de calibración, funcionamiento y análisis de la información de los parámetros que mide el dispositivo, se han registrado varios aspectos por mejorar en este aparato, entre ellos podemos considerar las siguientes actualizaciones:

- Circuito electrónico para autorevisión del funcionamiento y actualización remota de su programación. - Esto permitirá revisar el funcionamiento del sensor antes de iniciar con las mediciones, mediante el envío de una señal eléctrica de prueba. Asimismo, habilitará al dispositivo con conexión vía internet para que haya comunicación directa con el servidor, desde donde se transmitiría e instalaría la versión actualizada del software de funcionamiento del dispositivo.

- Capacidad de transmisión continua de datos de las mediciones de calidad del agua. - En este caso, se integra al microprocesador el elemento de conexión inalámbrica Wifi Direct, en vez del Bluetooth como actualmente está configurado. Esta opción proporciona comunicación directa, vía internet, servidor dispositivo (y viceversa servidor dispositivo), sin necesidad del celular intermediario como el caso del Bluetooth o el ruteador como es el caso del elemento Wifi normal. Las conexiones mediante Wi-Fi Direct son mucho más rápidas que las de Bluetooth, además que las transmisiones las realiza con más ancho de banda, *i.e.*, Wi-Fi Direct ofrece mayor velocidad de transferencia de datos entre dos

dispositivos y con mayor calidad que Bluetooth.

- Programar al microprocesador para promediar mediciones – Esto permitirá que, las mediciones reportadas por el dispositivo sean más representativas, en vez del valor instantáneo como ocurre actualmente, toda vez que las fluctuaciones de alta frecuencia serán filtradas que generalmente son señales de ruidos generados por la electrónica.

- Capacidad del dispositivo para medir calidad del agua de no potable. – Adecuar los sensores para otros rangos de concentración de parámetros de calidad del agua que el potable. Lo que permitirá aplicar el dispositivo para diagnosticar la calidad del agua para diversos usos.

- Facilidad de reemplazo de los sensores. – Esto permitirá reemplazar los sensores del dispositivo de una manera muy sencilla, como se reemplaza un foco de luz en los hogares. Para ello, se requiera la adaptación de la carcasa del dispositivo actual para que los sensores no están fijos a esta parte de la carcasa, si no que serán ensamblados, al estilo “click”.

- Carcasa más compacta. – Permitirá al dispositivo mayor versatilidad por su menor tamaño. Esto se logrará mediante el rediseño estructura de la carcasa que obedece, primero, al rediseño de los circuitos electrónicos y, en segundo lugar, al aprovechamiento al máximo de los espacios disponibles de la carcasa.

Asimismo, durante el proceso del desarrollo de los sensores del dispositivo, se abrieron nuevas oportunidades de diseño de sensores, especialmente de nanobiosensores para la detección de otros organismos como salmonela,

enterococos, bacilo *Vibrio cholerae* que produce el cólera, entre otros Savas *et al.*, 2024.

### 7. ¿En qué estamos?

Se cuenta con unos cuantos dispositivos que pueden usarse para la demostración de su funcionamiento, con el apoyo de alguno de los inventores. Estamos desarrollando la versión de uso público en donde la carcasa del dispositivo sea de uso rudo, completamente impermeable y de sellado hermético, así como la protección de los circuitos electrónicos protegidos contra la humedad y el plagio. Es decir, una versión para uso público que nos permita realizar demostraciones de su funcionamiento sin la necesidad de asistencia personal. Esta versión será también el prototipo para manufacturar el dispositivo de manera tal que podamos introducir en el mercado para todo público.

Con la experiencia adquirida del desarrollo del dispositivo descrito aquí, la aplicación de nanotecnologías, circuitos electrónicos impresos, la comunicación telemétrica y los protocolos de comunicación, ha permitido plantear nuevos desarrollos de vanguardia de sensores para el diagnóstico de la calidad del agua en sistemas naturales (cuerpos de agua superficiales y subterráneos) y confinados (redes de agua) compactos, de respuesta en tiempo real, versátiles para todo tipo de usuario y de bajo costo. De manera tal que puedan ser considerados como una alternativa viable para la detección temprana de la contaminación del agua en todos los sitios de muestreo actuales y por implementarse a nivel nacional, así como en muestras de agua que cualquier usuario quisiera diagnosticar la condición de su calidad. Este diagnóstico permitirá alertar en tiempo

real de realizar y/o intensificar los análisis fisicoquímicos, bacteriológicos y/o tóxicos necesarios en los sitios de atención señalados por el diagnóstico para verificar el grado de contaminación y así poder tomar las medidas de contingencia adecuadas para mantener en buenas condiciones la calidad del agua CONAGUA (2018).

Es decir, desarrollar plataformas de sensores portables de alta tecnología, sensibilidad, selectividad, compatibilidad y de bajo costo, para la medición de parámetros de calidad del agua capaces de diagnosticar y transmitir en tiempo real la condición de potabilidad, la presencia bacterias patógenas, los contaminantes de origen antropogénico y los contaminantes emergentes en el agua. Basados en

nuevas aplicaciones de nanotecnología, circuitos electrónicos impresos y de la comunicación telemétrica. En particular, generar la plataforma de sensores para la detección de contaminantes de origen antropogénica en el agua, mediante el desarrollo de nanosensores de *E. coli* Figura 7 que fue desarrollado en este proyecto, por otra parte para la detección de metales pesados (como pudieran ser: As, Cd, Pb, Cr, Ag, Zn o un indicador de la presencia de estos elementos químicos), presencia de materia orgánica (como pudieran ser los indicadores: oxígeno disuelto, DQO, carbón total), y compuestos orgánicos dañinas a la salud humana (como pudieran ser: cianuro, órgano-clorados o un indicador de la presencia de estos compuestos químicos).

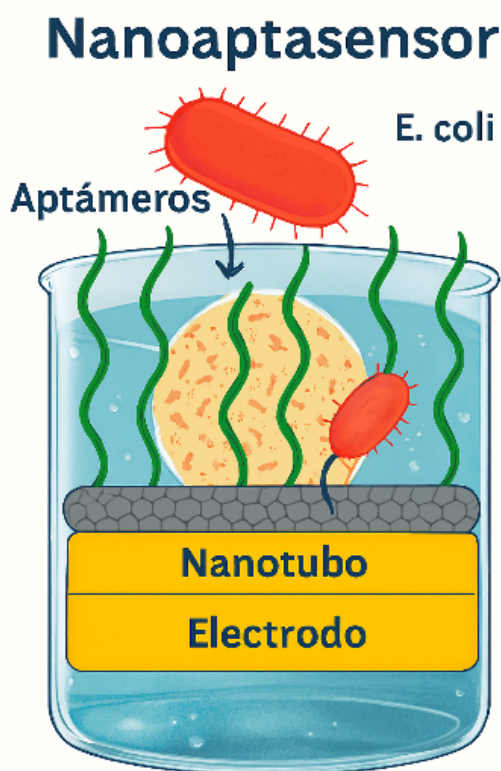



Figura 7: Nanosensor con nanotubos de carbono para *E. coli*

Asimismo, para la detección de contaminantes emergentes en el agua, mediante el desarrollo de nanosensores funcionalizados para la detección de nuevos componentes (como pudieran ser: antisépticos, esteroides, hormonas o un indicador de la presencia de este tipo de moléculas) Ali *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023.

## Referencias

- [1] Ali, M. R., Bacchu, M. S., Setu, M. A. A., Akter, S., Hasan, M. N., Chowdhury, F. T., & Khan, M. Z. H. (2021). Development of an advanced DNA biosensor for pathogenic *Vibrio cholerae* detection in real sample. *Biosensors and Bioelectronics*, 188, 113338.
- [2] A.R. E. Gómez-Reyes, O.A., Monroy, N. Batina, D. Jiménez, A.R. Abad, R. Constantino, D.P., Montero, F. O, Tapia, F. Ramirez, E. Velázquez, I. Morales, Hernández, A. Solís, J de J., Hernández, Mex. Pat. 387612, 2016; Biosensor para la detección de *E. coli* y dispositivo que lo comprende, IMPI, CDMX, Mexico.,387612,2021.
- [3] CONAGUA. Estadísticas del Agua en México, Edición 2018. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 2018.
- [4] DOF (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.
- [5] Huang, C. W., Lin, C., Nguyen, M. K., Hussain, A., Bui, X. T., & Ngo, H. H. (2023). A review of biosensor for environmental monitoring: principle, application, and corresponding achievement of sustainable development goals. *Bioengineered*, 14(1), 58–80. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2095089>
- [6] Lara Figueroa, H. N., & García Salazar, E. M. (2019). Prevalencia de enfermedades asociadas al uso de agua contaminada en el Valle del Mezquital. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*,7(21), 91-106.
- [7] Mazari-Hiriart, M., Tapia-Palacios, M. A., Zarco-Arista, A. E., & Espinosa-García, A. C. (2019). Challenges and opportunities on urban water quality in Mexico City. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 169.
- [8] Rodríguez, M. J, Rodríguez, G., Serodes, J., & Sadiq R. Subproductos de la desinfección del agua potable: Formación, aspectos sanitarios y reglamentación. *Interciencia*,32(11), 749-756, 2007. Recuperado en 26 de febrero de 2025, de <http://ve.scielo.org/scielo>
- [9] Savas, S., & Saricam, M. (2024). Rapid method for detection of *Vibrio cholerae* from drinking water with nanomaterials enhancing electrochemical biosensor. *Journal of Microbiological Methods*, 216, 106862.
- [10] Velázquez, E. (2024). Detección en Línea de la Calidad Microbiológica del agua (Tesis para obtener el grado de Doctora en Biotecnología). UAM-IZT.
- [11] Wang, L., Wang, H., Tizaoui, C., Yang, Y., Ali, J., & Zhang, W. (2023). Endocrine disrupting chemicals in water and recent advances on their detection using electrochemical biosensors. *Sensors & Diagnostics*,2(1), 46-77.



**Coexistencia  
humanos-mamíferos  
silvestres: manejo integral y  
participación social**

**L.D.S. Flor Edith Hernández Jacinto**

División de Desarrollo Sustentable, Universidad  
Intercultural del Estado de México

**Dra. en C. A. y R.N. Yuriana Gómez Ortiz**

División de Desarrollo Sustentable, Universidad  
Intercultural del Estado de México

**Dr. en C. A. y R.N. Hublester Domínguez  
Vegaómez Ortiz**

División de Desarrollo Sustentable, Universidad  
Intercultural del Estado de México

**Dr. en C. A. y R.N. Leroy Soria Díaz**

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,  
Universidad Autónoma de Tamaulipas

## Abstract

It is important to acknowledge the role of wild mammals in maintaining ecological balance and contributing to human culture. However, it is also crucial to recognise that their interactions with people can sometimes result in conflict, particularly when they attack livestock or cause crop damage. However, it is important to acknowledge the crucial role these animals play in the ecosystem, as pest controllers and seed dispersers. In Mexico, for example, there is a rich tapestry of cultural myths and legends that reflect community perceptions of these animals. It is therefore vital to care for and coexist with these species to prevent environmental problems. Some species, such as the tuza, contribute to soil fertility, while others are part of the food chain. It is therefore suggested that coexistence with these species is crucial to avoid environmental problems, and that the use of biological control is recommended to maintain ecological functions, as well as social participation in the management of strategies for coexistence.

**Keywords:** co-production of knowledge, human-wildlife interactions, pest management, myths

## Resumen

Los mamíferos silvestres son cruciales para el equilibrio ecológico y enriquecen la cultura humana. Si bien sus interacciones con las personas pueden generar conflictos, como daños a cultivos o ataques al ganado, su rol en los ecosistemas es innegable: controlan plagas y dispersan semillas. La diversidad de mitologías y leyendas en México refleja la profunda conexión entre las comunidades y estos animales. Para prevenir problemas ambientales, aprovechar sus beneficios y reconocer el valor intrínseco de cada especie, es

fundamental promover la coexistencia entre la humanidad y la fauna silvestre, destacando su importancia para la salud del planeta y la nuestra. Especies como la tuza mejoran la fertilidad del suelo, mientras que otras son eslabones vitales en la cadena alimentaria. Para fomentar esta coexistencia y mitigar los daños económicos, en casos necesarios, se sugieren al menos dos estrategias generales: (1) implementar control biológico para asegurar la continuidad de las funciones ecológicas de las especies y (2) fomentar la participación social en la gestión de estrategias de coexistencia sostenible, adaptadas a cada contexto.

**Palabras clave:** coproducción de conocimientos, interacciones humano-fauna silvestre, control de plagas, mitos

¿Recuerdas las historias que nos contaban nuestros abuelos sobre aquellos encuentros con algunos mamíferos silvestres? En la cultura otomí se cuenta que el coyote es un ser sagrado, al que se le llama “tío” para hacer referencia a que es un animal sabio y de respeto. Las personas dicen que cuando huele a tortilla quemada es porque el coyote anda por allí. Se dice que el coyote adquirió ese olor debido a que en el inicio de los tiempos el coyote interactuaba con los hombres y le regaló el fuego a una pareja de recién casados para que pudieran cocinar, sin embargo, se les quemaron las tortillas y con estas alimentaron al coyote, y desde entonces el coyote huele a tortilla quemada (Gómez-Sánchez y Pedraza-Durán, 2018).

Los mamíferos silvestres son animales fascinantes que han cautivado nuestra imaginación por generaciones. A pesar de la disminución de la

riqueza y abundancia de especies, se siguen considerando comunes en muchos espacios antropizados tales como cultivos, zonas ganaderas o incluso en los alrededores de nuestros hogares. Algunas especies que son frecuentemente avistadas incluyen coyotes, cacomixtles, mapaches, armadillos, murciélagos, tlacuaches, ardillas, conejos, entre otros. Existe una amplia diversidad de interacciones entre nosotros y los mamíferos silvestres con los que compartimos el espacio, algunas son benéficas y otras negativas (Treves, 2007). Por ejemplo, con el grupo de carnívoros son frecuentes las interacciones negativas, donde jaguares, pumas, coyotes, lobos, entre otros, consumen ganado y en consecuencia los dueños de estos animales toman represalias y buscan eliminarlos. Otros aspectos que nos hacen interactuar con los animales incluyen las emociones, las conductas, los usos y la forma de pensar que tenemos hacia la fauna. Por otra parte, aún se mantienen creencias o mitos sobre estos animales y algunos son asociados a desgracias y mal agüero, lo que contribuye a generar una percepción negativa (Téllez-Hernández *et al.*, 2021); que termina afectando la relación que mantenemos con los mamíferos silvestres, por lo que es necesario reconocer y difundir su importancia cultural y ecológica, así como algunas estrategias empleadas en diferentes contextos para su coexistencia. La intención de este escrito es promover la difusión y divulgación de la importancia de los mamíferos silvestres y el cómo nos relacionamos y coexistimos con ellos.

¿Te habías preguntado sobre la importancia cultural de estas especies? Algunos mamíferos silvestres son sumamente importantes en varias regiones de México y el mundo, ya que han sido parte de la cultura. En México,

se han documentado algunos mitos de mamíferos silvestres, por ejemplo, una creencia que se tiene sobre el coyote es que puede hipnotizar a las personas y animales con su “vaho”. En el norte del Estado de México, también se cuenta entre los abuelos que el coyote era considerado como la mascota del diablo y cuando una persona lo mataba, tenía que amarrarlo a un tronco y pasearlo por el pueblo para que las personas de la comunidad dieran ofrendas en agradecimiento por matar a un animal “malo”. Sin embargo, en la cultura mazahua se cree que si el coyote, o incluso otro animal, te causa algún daño, no debes enfadarte o tomar represalias ya que volverá y hará más daño, y solo debes aceptar que estos animales buscan alimentarse. Para el caso del cacomixtle se cree que, si este animal llega a tu casa y lo corres, este se enojará por ser maltratado y en venganza se comerá a algunos animales del hogar (*e.g.* pollos, conejos, etc.); mientras que los mapaches y conejos silvestres son considerados como atrayentes de la buena suerte.

Algunos mitos pueden llegar a ser un riesgo que afecta poblaciones enteras de algunas especies llegando incluso a la extirpación o eliminación; por ejemplo, en las comunidades se cree que los murciélagos son ratones viejos con alas o vampiros que se alimentan de sangre humana, las personas creen que la presencia de los murciélagos representa una amenaza hacia su salud y toman la decisión de eliminarlos. No sólo los mitos son una amenaza para los animales, también influye la forma en la percibimos a algunas especies y las acciones negativas que hacemos (*e.g.* matar a algunos animales por creer que son una amenaza para nuestro ganado, para nuestra salud o para nuestros cultivos o simplemente por su apariencia). Un ejemplo de esto es

el caso del lobo gris mexicano, que fue perseguido y erradicado como represalia por la depredación de ganado hasta su extinción en vida silvestre, y esto llevó a la inversión en programas de reproducción en cautiverio para su reintroducción en vida libre. Otras especies, llegaron a la extinción, como el caso del oso pardo.

Desde los mamíferos más grandes como lobos, osos, jaguares y pumas hasta los más pequeños como musarañas, murciélagos y ratones, juegan importantes roles dentro del hábitat; aun cuando algunos mamíferos pueden ser culturalmente rechazados. Por ejemplo, el coyote es mal visto por algunas personas, sin embargo, es una especie que controla poblaciones de otros vertebrados más pequeños al alimentarse de éstos (*i.e.* ratones, tuzas, etc.). Lo mismo ocurre para el cacomixtle y el mapache, ya que se alimentan de ratones, insectos y frutas; por lo que además de controlar las poblaciones también, son dispersores de semillas. Algunos mamíferos sirven de alimento para otros animales, como el caso de los conejos, las ardillas, armadillos, que son parte de la dieta de pumas, jaguares, coyotes, etc. Además, hay especies que aportan beneficios al suelo, a través de túneles y madrigueras, como es el caso de la tuza que ayuda con la aireación y fertilización del suelo. Por lo tanto, si no queremos ver plagas, y queremos suelos fértiles y bosques funcionales, entonces es importante cuidar a estos animales y pensar en estrategias que nos lleven a coexistir con ellos, ya que sin ellos puede haber consecuencias negativas para el ambiente y para la calidad de vida de las personas.

¿Qué pasaría si quitamos a los mamíferos silvestres que viven a nuestro alrededor? Seguramente has escuchado

que cuando una especie es extirpada o eliminada de su hábitat natural, puede afectar el equilibrio ecológico de la naturaleza. Para ilustrar esta situación imaginemos que tenemos un equipo de fútbol con excelentes jugadores y cada uno tiene una posición importante para que el equipo funcione. Si uno de esos jugadores desaparece, el equipo se vuelve débil y puede que no gane el partido. Lo mismo pasa con el funcionamiento de la naturaleza en la que cada especie tiene un papel importante, algunos mamíferos son controladores de plagas de ratones o insectos, dispersores de semillas, polinizadores e incluso algunos sirven de alimento para otros animales. Así que, para mantener fuerte al equipo de los mamíferos silvestres, debemos ser tolerantes y valorar el trabajo que hacen todos los días.

Pero ¿Por qué tenemos relaciones negativas con los mamíferos silvestres? La respuesta a esta pregunta depende de muchos factores. Pero de forma general podemos decir que nuestra vida diaria influye de manera significativa, algunos aspectos tan básicos como la forma en la que nos expresamos cotidianamente puede tener influencia en las actitudes y acciones que tomamos respecto a otras especies. Es decir, el lenguaje que usamos para describir los encuentros con los animales silvestres influye en la forma en la que interpretamos o imaginamos experiencias y relaciones. Las interacciones se han clasificado en positivas (coexistencia, beneficios mutuos) y negativas (daños, amenazas) en relación con el beneficio o perjuicio que generan (Peterson *et al.*, 2010). Los conflictos surgen cuando predominan las interacciones negativas y generan impactos adversos. Por lo que las interacciones negativas se han asociado con el concepto de conflicto

humano-fauna silvestre. El conflicto humano-fauna silvestre se refiere a la amenaza que representa la fauna silvestre a la propiedad, recreación y la seguridad humana (Hill, 2015). Se puede decir que los conflictos surgen cuando las actividades de la fauna silvestre chocan con las actividades humanas, y estos últimos lo perciben como un problema, lo cual es relativo y depende de múltiples factores personales y culturales.

¿Qué estrategias podemos usar para reducir posibles daños? La mayoría de los “conflictos” están vinculados principalmente con un manejo inapropiado del ganado como el pastoreo cerca o dentro del bosque sin vigilancia, no enterrar ganado muerto, entre otros; aunque también se ha asociado con otros factores como el aumento artificial de presas, el exceso o falta de lluvias, la distancia de algunos recintos ganaderos a los bosques, entre otros).

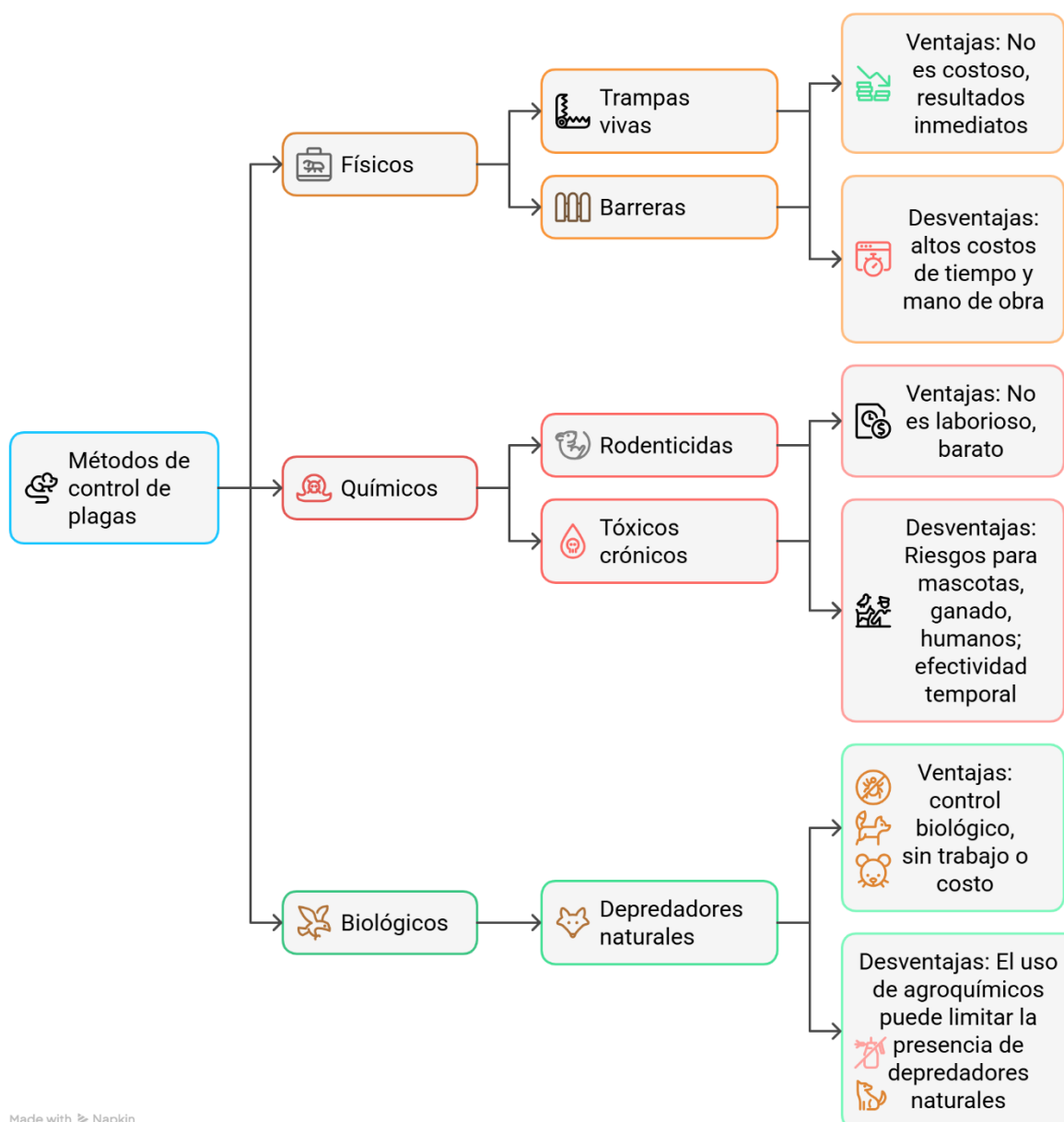
Para el caso del daño a los cultivos, este se ha asociado con la ubicación de la parcela, dejar residuos de maíz u otro cultivo en la milpa, monocultivos, no hacer rotación de cultivos. El manejo que le demos a nuestras parcelas o ganado dependerá de la frecuencia en la cual los animales silvestres visiten las zonas donde se ubique el ganado o las parcelas. Para evitar los daños a cultivos se recomienda hacer rotación de cultivos, evitar dejar residuos de maíz después de las cosechas; y para el caso de la depredación de ganado, se recomienda evitar el pastoreo libre, sin vigilancia y cerca de zonas boscosas.

A lo largo del tiempo se han usado diferentes métodos de control para

reducir la presencia de algunos mamíferos, estos pueden ser físicos, químicos o biológicos (Fig. 1; Sánchez-Cordero *et al.*, 2022). Los métodos de control físicos han resultado efectivos para reducir los daños de mamíferos, aunque son demandantes en cuestión de tiempo, ya que el uso de trampas de captura y liberación implica la revisión diaria.

El uso de barreras físicas, ya sean cercas eléctricas o cercas con mallas, requiere mantenimiento, lo cual implica gastos en las reparaciones o repuestos y su efectividad a largo plazo puede reducirse. En casos de especies plaga, se ha recurrido a la eliminación con métodos químicos. Éstos pueden resultar efectivos al instante, ya que acaban con la mayoría de los roedores; sin embargo, se ha documentado que su efectividad es por tiempo determinado; ya que hay especies que se adaptan a este tipo de químicos e incluso llegan a reproducirse en mayor cantidad, como respuesta a la reducción drástica de sus poblaciones, como las ratas.

Bajo este panorama, lo más recomendable es el uso de los métodos de control biológico, así los mamíferos silvestres cumplen con su función de depredar a otros vertebrados, no se requiere de trabajo o inversión de tiempo cuando ocurren de forma natural. Sin embargo, es necesario mantener el hábitat para que se integren los depredadores como las serpientes, aves rapaces, cacomixtles, coyotes, etc. En algunos casos se trabaja en la colocación de sitios de percha y montículos para madrigueras o refugios.



Made with Napkin

Figura 1: Métodos de control de daño a cultivos usados para mamíferos silvestres pequeños

La efectividad de los tres tipos de métodos no es total, por ello, es recomendable promover métodos físicos y biológicos, antes que los químicos ya que pueden poner en riesgo a la salud humana, fauna silvestre, el propio ganado y la calidad de los alimentos. Es recomendable combinar varias técnicas y cambiar de estrategia cada uno o tres meses. Por lo tanto, es difícil saber cuál estrategia es la ideal para resolver el conflicto o las plagas. Algunos

campesinos usan sus propias estrategias para ahuyentar y reducir el daño (*i.e.* tiros al aire o tronadores para ahuyentar a los depredadores, ceniza alrededor de cada cultivo). Por lo tanto, las estrategias que se han empleado se han dividido en directas e indirectas. Las directas implican esfuerzos físicos por parte de los campesinos, por ejemplo, hacer visitas diarias a sus parcelas, colocar y revisar trampas de captura, realizar la liberación de forma segura y en

un sitio adecuado (Fig. 2, Fig. 3). Sin embargo, los campesinos han usado estas estrategias directas ya que hay otras que son costosas tanto por su instalación como por su mantenimiento, como es el caso de las cercas eléctricas. Las estrategias indirectas no implican

esfuerzos físicos, pero se necesita de la intervención de gente especializada para abordar algunos temas de educación ambiental, gestión de incentivos o investigación (Fig.4; Rodríguez-Calderón *et al.*, 2018; Treves, 2009).



Figura 2: Estrategias directas para reducir el daño a los cultivos causado por mamíferos silvestre



Figura 3: Estrategias directas para reducir la depredación de ganado causada por mamíferos silvestres



Figura 4: Estrategias indirectas para reducir el daño a cultivos y depredación de ganado causada por mamíferos silvestres

Para lograr la coexistencia y las interacciones positivas entre la fauna silvestre y los humanos es importante considerar el factor social. Es decir, sumar en los proyectos y en la toma de decisiones a los actores clave e interesados; pero no de una manera en la que solo se obtenga información (*i.e.* entrevistas, cuestionarios, encuestas), sino que se desarrollen actividades participativas para el intercambio de conocimientos académicos y locales. Existe la necesidad de generar estrategias con las propias comunidades e incluir a las personas en el diseño de manejos integrados para reducir el conflicto humano-fauna silvestre. Algunos métodos participativos como la investigación acción participativa, la coproducción de conocimientos (Tengö *et al.*, 2017), el codiseño (Gómez-Ortiz *et al.*, 2024), pueden ser la guía metodológica para promover que junto con las comunidades se diseñen y propongan estrategias para resolver problemas identificados colectivamente.

## Agradecimientos

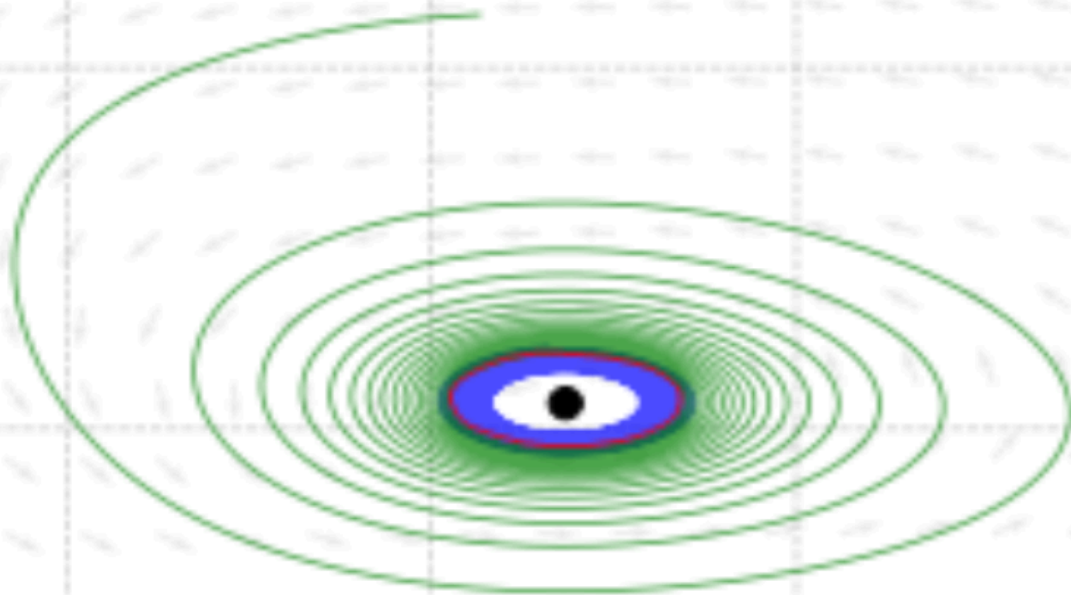
A SECIHTI por la beca de manutención para estudios de posgrado en la Maestría en Gestión de la Innovación Rural Sustentable y a los habitantes de la región otomí y mazahua que nos han compartido su conocimiento.

## Literatura consultada

- [1] Gómez-Ortiz, Y., Domínguez-Vega, H., y Huerta-Cardoso, O., *Resignificación de los paisajes bioculturales asociados al agua: reconocimiento y codiseño para su conservación por los pueblos originarios*. Universidad Intercultural del Estado de México, México, 2024, pp. 64-72.
- [2] Gómez-Sánchez, D. y Pedraza-Durán, I., El coyote protagonista de las cosmogonía otomí-mazahua. Un análisis desde los mitos de la creación. *Mitológicas*, pp. 23-24, 2018.

- [3] Hill, C.M., Perspectives of “conflict” at the Wildlife-Agriculture Boundary: 10 Years On. *Human Dimensions Of Wildlife*, 20[4], pp. 296-301, 2015.
- [4] Rodríguez-Calderon, Y.G., Contreras-Moreno, F.M., Segura-Bertolini, E.C., Bautista-Ramírez, P., y Jesús-Espinosa, D., Análisis del conflicto entre la fauna silvestre y productores rurales en dos comunidades de Balacán, Tabasco, México. *AgroProductividad*, 11[6], pp. 51-59, 2018.
- [5] Sánchez-Cordero, G., Rodríguez, Á., y Flores, J., Roedores y riesgo agrícola. El modelado del nicho ecológico como herramienta de predicción. *Fes Zaragoza, México*, 2022.
- [6] Peterson, M.N., Birckhead, J.L., Leong, K., Peterson, M.J., y Peterson, T.R., Rearticulating the myth of human-wildlife conflict. *Conservation Letters*, 3[2], pp. 74-82, 2010.
- [7] Téllez-Hernández, E., Domínguez-Vega, H., Gómez-Sánchez, D., Ávila-Nájera, D. M., y Gómez-Ortiz, Y., Lo que de noche se hace de día aparece: murciélagos trabajando. *Herreriana*, 2[2], pp. 9-14, 2021.
- [8] Tengö, M., Hill, R., Malmer, P., Raymond, C.M., Spierenburg, M., Danielsen, F., y Folke, C., Weaving knowledge systems in IPBES, CBD and beyond-lessons learned for sustainability. *Current opinion in environmental sustainability*, 26, pp. 17-25, 2017.
- [9] Treves, A., Balancing the needs of people and wildlife: When Wildlife Damage Crops and Prey on Livestock. *Land Tenure Center, Nelson Institute of Environmental Studies, University of Wisconsin*. 7, pp. 1-11, 2007.
- [10] Treves, A., The Human Dimensions of Conflicts with Wildlife around Protected Areas. *Wildlife and Society: The Science of Human Dimensions*. Islandpress, pp. 214-228, 2009.

# Oscilaciones sostenidas en cultivos: modelos simples, efectos reales



**Dra. Martha Álvarez Ramírez**

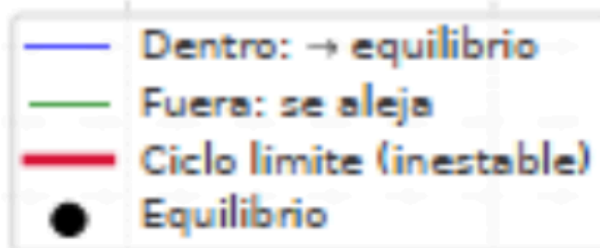
Departamento de Matemáticas, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa

**M. C. Carlos Eduardo Gómez Sánchez**

Departamento de Matemáticas, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa  
Departamento de Bioingeniería, Tecnológico de Monterrey Campus Estado de México

**Dr. Julio Ernesto Solís Daun**

<sup>1</sup>Departamento de Matemáticas, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa



0.2

0.4

0.6

0.8

S (g/L)

## Abstract

Bioreactor is a key equipment in the production of biomolecules for the biotechnological industry. Nevertheless, under certain conditions, oscillations in cell growth and substrate consumption may suddenly arise, drastically affecting operation and productivity. This oscillatory behavior results from complex interactions between microorganisms and operational conditions. These interactions remain poorly understood from the perspective of bioreactor dynamics, which makes it difficult to identify the operational parameters that trigger oscillations. In this work, we show how the unstructured Haldane model proved useful in understanding and predicting such oscillatory behavior. For this purpose, an analysis of the equilibrium points and their stability was performed using the qualitative theory of differential equations. The analysis revealed a Hopf bifurcation, with a threshold marking the transition from a stable equilibrium point to a stable oscillatory behavior (limit cycle) at  $S^* \approx \sqrt{K_s K_i}$ . The feed substrate concentration  $S_{in}$  was identified as the bifurcation parameter responsible for this stability transition. This approach allowed us to gain insight into the dynamic nature of the bioreactor and opens the door to the design of improved operational and control strategies.

**Keywords:** Chemostat, Haldane model, Dynamical System, Stability, Hopf bifurcations.

## Resumen

Los biorreactores son equipos clave en la producción de biomoléculas de interés biotecnológico. Sin embargo, bajo ciertas condiciones pueden presentarse oscilaciones inesperadas en el crecimiento celular y en el consumo de

nutrientes, lo que afecta drásticamente su operación y productividad. Estas oscilaciones reflejan las complejas interacciones entre los microorganismos y las condiciones de operación. El problema es que dichas interacciones siguen siendo poco comprendidas desde la perspectiva de la dinámica de los biorreactores, lo que dificulta identificar los parámetros operacionales que desencadenan las oscilaciones. En este estudio mostramos cómo el modelo matemático no estructurado de Haldane puede ayudar a comprender y predecir estos comportamientos. Para ello, se analizaron los puntos de equilibrio de dichos modelos y su estabilidad utilizando la teoría cualitativa de las ecuaciones diferenciales ordinarias. Este análisis reveló la aparición de una bifurcación de Hopf, con un umbral de transición desde un punto de equilibrio estable hacia una oscilación estable (ciclo límite) dado por  $S^* \approx \sqrt{K_s K_i}$ . El parámetro de bifurcación que se identificó fue la concentración de sustrato en el medio fresco de alimentación,  $S_{in}$ . Este enfoque ofrece una comprensión más profunda de la naturaleza dinámica de los biorreactores y abre nuevas posibilidades para el diseño de estrategias de operación y control más eficientes.

**Palabras clave:** Quimiostato, Modelo de Haldane, Sistemas dinámicos, Estabilidad, Bifurcaciones de Hopf.

## Introducción

El término quimiostato se refiere a una técnica de cultivo en un biorreactor, donde el flujo de medio fresco que entra es igual al flujo de medio gastado que sale, permitiendo que el volumen y la concentración de las especies químicas en el biorreactor permanezcan constantes. Bajo esta condición, se dice que el quimiostato opera en estado

estacionario [1]. En la figura 1 se esquematizan los elementos básicos de un quimiostato.

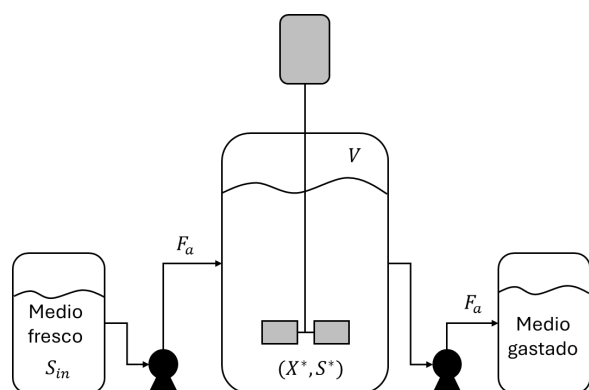


Figura 1: Esquema de un biorreactor operado en estado estacionario. A esta técnica de cultivo se le conoce como *quimiostato*. En el esquema,  $F_a$  es el flujo volumétrico,  $V$  es el volumen del medio de cultivo,  $S_{in}$  es la concentración de sustrato en el medio fresco de alimentación y  $(X^*, S^*)$  son las concentraciones de biomasa y sustrato que se alcanzan cuando el biorreactor opera en estado estacionario.

En la figura 2 se muestra una imagen de un biorreactor de 14 L de volumen, operado en estado estacionario. A primera vista, esto parece sólo un tanque con tuberías, sensores y una pantalla, pero en su interior ocurre algo mucho más fascinante: millones de células que se alimentan, respiran y crecen. Más allá de su valor como herramienta productiva, el quimiostato es un laboratorio vivo que permite estudiar y comprender cómo las células producen medicamentos, alimentos, combustibles y soluciones ambientales. Las aplicaciones de esto son amplias, entre las cuales destacan: (i) la producción de antibióticos, enzimas, vitaminas, vacunas, cerveza yogurt y (ii) la producción de etanol, biogás o hidrógeno.



Figura 2: Fotografía de un biorreactor operado como quimiostato.

Como cualquier sistema vivo, su comportamiento no siempre es predecible. Un cambio aparentemente pequeño, en la alimentación, el pH o el oxígeno, puede provocar respuestas desproporcionadas e inesperadas: fluctuaciones súbitas en la cantidad de células y sustrato, y en el peor de los casos, la pérdida total de biomasa en el biorreactor (el así denominado *lavado del biorreactor*).

Frente a esta complejidad, modelar no se trata de un lujo matemático sino, más bien, una herramienta de análisis. Un buen modelo traduce el proceso en ecuaciones que permiten explorar escenarios sin necesidad de gastar litros de medio ni semanas de ensayo y error en experimentos. Con ello, es posible responder preguntas clave como: ¿qué pasa si aumentamos un 10% el sustrato en el medio fresco de entrada? ¿cuál es el intervalo seguro de dilución para evitar el lavado del

biorreactor? ¿cómo influye un inhibidor en la productividad? Modelar permite anticipar riesgos, optimizar procesos y diseñar estrategias de control antes de que el proceso llegue a la industria.

En biorreactores operados como quimiostato, se han observado fenómenos dinámicos que van mucho más allá de un estado estacionario simple. Entre ellos, destacan las oscilaciones sostenidas en las concentraciones de biomasa y sustrato, a menudo acompañadas por variaciones sincronizadas en intermediarios metabólicos o productos finales [2]. Este comportamiento, documentado experimentalmente desde la década de 1980, se ha registrado en:

- Cultivos de *Saccharomyces cerevisiae*, usada en panificación y fermentación alcohólica.

- Fermentaciones con *Zymomonas mobilis*, reconocida por su alta producción de etanol.

- Cultivos de *Escherichia coli*, para la producción de proteínas recombinantes, bajo condiciones específicas de limitación de oxígeno.

Experimentos con *Saccharomyces cerevisiae* o *Zymomonas mobilis* en cultivos continuos han registrado oscilaciones de sustrato y biomasa con periodos bien definidos. De hecho, como señalan Ajbar y colaboradores [3], basta un cambio moderado en los parámetros de operación para pasar de un régimen estacionario estable a un oscilador robusto. Además, existe la posibilidad de *biestabilidad dinámica*: que, en ciertos intervalos de la tasa de dilución, las oscilaciones y un equilibrio estacionario estable coexisten, de modo que perturbaciones

pequeñas pueden hacer “saltar” al sistema de un estado al otro. Bajo estas condiciones, combinaciones particulares de parámetros, tasa de dilución  $D$ , concentración de sustrato en la alimentación  $S_{in}$ , temperatura, pH y oxígeno disuelto, pueden llevar al sistema a un régimen periódico estable. En éste, el sustrato fluctúa con un periodo característico y la biomasa responde con un desfase: cuando el sustrato está en su punto máximo, la biomasa está en mínimo, y viceversa. Este desfase es típico de sistemas no lineales con retroalimentación.

Desde el punto de vista de la ingeniería de bioprocesos, el reto es mantener activos a los microorganismos, garantizar el suministro de nutrientes, retirar productos tóxicos y recolectar eficientemente el producto de interés. Las condiciones internas dependen de interacciones complejas entre las células y las condiciones de operación. Por ejemplo, si el sustrato entra demasiado rápido al biorreactor, la biomasa puede salir del biorreactor más rápido que lo que crece y así perderse; mientras que si entra demasiado lento, la producción se detiene porque las células microbianas no pueden consumir el sustrato a la misma velocidad que se suministra, ocasionando inhibición.

El interés por comprender estas oscilaciones es triple:

- 1) Perspectiva biológica: revelan mecanismos internos de regulación y posibles *ciclos límite metabólicos* en los que la dinámica bioquímica y la macroscópica se acoplan.

- 2) Perspectiva industrial: afectan la productividad, modificando la concentración media de producto y la eficiencia de conversión respecto a la

operación estacionaria.

3) Perspectiva de control: obligan a replantear la estrategia de operación, ya que un controlador diseñado para un punto fijo puede ser ineficaz en presencia de oscilaciones.

Para comprender y predecir el comportamiento de un biorreactor es necesario traducir sus procesos biológicos en un lenguaje matemático. Ese lenguaje son las ecuaciones diferenciales, que permiten describir cómo cambian las variables del sistema en el tiempo y constituyen la base de los modelos dinámicos que utilizaremos a lo largo de este trabajo. De manera sencilla, una ecuación diferencial ordinaria (EDO) expresa la evolución de una cantidad (o un vector de cantidades)  $x(t)$  mediante una regla:

$$\dot{x}(t) = \frac{dx}{dt} = F(x(t), t; \mu) \quad (1)$$

donde  $t$  denota al tiempo,  $F$  representa el “campo de velocidades” y  $\mu$  denota al conjunto de parámetros del modelo. Cuando  $F$  no depende explícitamente de  $t$  (caso *autónomo*), la EDO define un *sistema dinámico*: dada una condición inicial  $x(0) = x_0$ , esta regla determina de forma determinista la trayectoria  $x \mapsto x(t)$ .

Un *punto de equilibrio* (o estado estacionario) es aquel que no cambia en el tiempo. En sistemas autónomos se caracteriza por la solución de la ecuación algebraica:

$$F(x^*; \mu) = 0. \quad (2)$$

En otras palabras, se obtiene resolviendo un sistema algebraico de ecuaciones, al igualar a cero las componentes de  $F$ .

La *estabilidad* de un punto equilibrio describe si las soluciones, ante pequeñas perturbaciones, regresan a él o, por el contrario, se apartan del mismo, conforme transcurre el tiempo. Para analizarla, se suele linearizar el sistema en  $x^*$  mediante la matriz jacobiana

$$J = \frac{\partial F_i(x^*)}{\partial x_j}$$

y se estudian sus valores propios.

Una *órbita periódica* es una solución que se repite tras un cierto periodo  $T > 0$ :

$$x(t + T) = x(t) \quad (3)$$

Si, además, ésta atrae trayectorias vecinas, se denomina *ciclo límite*. Las órbitas periódicas representan *oscilaciones sostenidas* (ritmos) y son fundamentales para explicar fenómenos repetitivos en biología y en ingeniería. Con frecuencia éstas surgen a través de una *bifurcación de Hopf*, la cual consiste en que un punto de equilibrio pierde estabilidad y surge un ciclo límite.

El *espacio fase* (o espacio de estados) es el conjunto de todos los valores posibles de las variables del sistema. Para un sistema autónomo

$$\dot{x} = F(x; \mu), \quad \forall x \in \mathbb{R}^n, \forall \mu \in \mathbb{R}^m \quad (4)$$

el espacio fase es  $\dot{x} \subseteq \mathbb{R}^n$ . Cada condición inicial  $x_0 \in X$  genera una trayectoria  $t \mapsto x(t) = \varphi_t(x_0)$ , y los objetos dinámicos (equilibrios, órbitas periódicas/ciclos límite, variedades estables e inestables, atractores) son *subconjuntos invariantes* de  $X$ .

En sistemas de dos variables, el *retrato de fase* es la representación en el plano de las trayectorias y del campo de direcciones, herramienta clave para visualizar estabilidad y la geometría de los ciclos.

En este caso particular de  $n = 2$ , para

$$F = [f(x_1, x_2), g(x_1, x_2)]$$

la derivada está dada por la matriz jacobiana

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1, x_2) & \frac{\partial f}{\partial x_2}(x_1, x_2) \\ \frac{\partial g}{\partial x_1}(x_1, x_2) & \frac{\partial g}{\partial x_2}(x_1, x_2) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

$\det J < 0$	Silla inestable
$\det J > 0, \Delta > 0$	Nodo (Estable si $\text{tr } J < 0$ e inestable si $\text{tr } J > 0$ ).
$\det J > 0, \Delta < 0$	Foco o espiral estable si $\text{tr } J < 0$ e inestable si $\text{tr } J > 0$
$\det J > 0, \text{tr } J = 0$	Centro

El polinomio característico asociado es

$$p(\lambda) = \lambda^2 - (\text{tr } J)\lambda + \det J, \quad (6)$$

cuyas raíces  $\lambda_1, \lambda_2$  son los valores propios de  $J$ . Aquí,

$$\text{tr } J = \frac{\partial f}{\partial x_1} + \frac{\partial g}{\partial x_2} \quad (7)$$

es la traza de la matriz y

$$\det J = \frac{\partial f}{\partial x_1} \frac{\partial g}{\partial x_2} - \frac{\partial f}{\partial x_2} \frac{\partial g}{\partial x_1} \quad (8)$$

es la determinante de la matriz. El discriminante

$$\Delta = (\text{tr } J)^2 - 4 \det J \quad (9)$$

determina la naturaleza de las raíces del polinomio característico:

- $\Delta > 0 \Rightarrow$  valores propios reales y distintos
- $\Delta = 0 \Rightarrow$  valores propios reales e iguales
- $\Delta < 0 \Rightarrow$  valores propios complejos conjugados.

Además, usando el hecho de que

$$\text{tr } J = \lambda_1 + \lambda_2 \quad \text{y} \quad \det J = \lambda_1 \lambda_2,$$

se obtiene la clasificación de estabilidad de los puntos de equilibrio  $E^* = (x_1^*, x_2^*)$ :

Una bifurcación es un cambio cualitativo en la dinámica descrita por un sistema de ecuaciones diferenciales que ocurre al variar un parámetro. En otras palabras, describe cómo se transforman los equilibrios u oscilaciones del sistema cuando cambian las condiciones del modelo.

Ahora, enunciaremos un par de teoremas que nos ayudarán a identificar la existencia de una bifurcación.

**Teorema 1.** Considérese la ecuación diferencial de la ecuación (4), con un equilibrio  $E^*(\mu)$  dependiente del parámetro. Supóngase que, para  $\mu = \mu_0$ , la matriz jacobiana evaluada en  $E^*(\mu_0)$  posee un par de valores propios imaginarios puros  $\pm i\omega_0$ , con  $\omega_0 > 0$ , y que los demás de valores propios tienen parte real negativa  $\text{Re}(\lambda(\mu)) < 0$ . Entonces, en un entorno del punto de equilibrio  $E^*(\mu_0)$  el sistema puede experimentar una bifurcación de Hopf. Si, además, se cumple la condición de transversalidad

$$\frac{d}{d\mu} \text{Re}(\lambda(\mu_0)) \neq 0, \quad (10)$$

se garantiza la aparición o desaparición de una familia de ciclos límite.

Este teorema es importante porque constituye una explicación simple y universal del origen de ritmos sostenidos en contextos tan diversos como la física,

la biología o la ingeniería.

**Teorema 2.** (*Coefficiente de Lyapunov en la bifurcación de Hopf*). Considérese nuevamente la ecuación (4), dependiente del parámetro  $\mu \in \mathbb{R}^m$ . Supóngase que para un valor crítico  $\mu = \mu_0$ , un equilibrio  $E^*$  posee un par de valores propios puramente imaginarios de la forma  $\pm i\omega_0$  con  $\omega > 0$ , mientras que los demás valores propios tienen parte real negativa  $R(\lambda) < 0$ . Entonces, existe un número real  $\ell_1$ , denominado primer coeficiente de Lyapunov, cuyo signo determina el carácter de las oscilaciones periódicas que surgen como:

- Si  $\ell_1 < 0$ , la bifurcación es **supercrítica**: aparece una familia de ciclos límite estables de pequeña amplitud en el entorno de  $\mu_0$ .
- Si  $\ell_1 > 0$ , la bifurcación es **subcrítica**: surge una familia de ciclos límite inestables de pequeña amplitud y, típicamente, se destruye un ciclo estable cercano.
- Si  $\ell_1 = 0$ , se dice que el caso es **degenerado** (bifurcación de Bautin) y es necesario calcular coeficientes de Lyapunov de orden superior.

De forma intuitiva, cerca de la bifurcación, la dinámica puede reducirse al siguiente sistema de ecuaciones diferenciales en coordenadas polares:

$$\dot{r} = r(\alpha(\mu - \mu_0) + \beta r^2 + \dots) \quad (11)$$

donde  $r$  representa la amplitud de las oscilaciones. El coeficiente  $\ell_1$  es proporcional a  $\beta$ , y su signo determina si los ciclos que aparecen son estables ( $\ell_1 < 0$ ) o inestables ( $\ell_1 > 0$ ). Para una exposición más detallada se recomienda consultar el libro clásico de Guckenheimer y Holmes [6].

Este análisis lineal constituye la base para el estudio cualitativo de modelos más complejos. En particular, el uso de ecuaciones diferenciales permite describir de manera sistemática la evolución temporal de variables biológicas relevantes, tales como sustrato, biomasa y productos, así como: (i) Predecir el comportamiento ante cambios operativos, (ii) determinar condiciones para maximizar la producción, (iii) Analizar fenómenos como biestabilidad, oscilaciones y bifurcaciones y (iv) diseñar estrategias de control para mantener un régimen deseado.

Aunque el quimiostato clásico con rendimiento constante predice un único equilibrio estable, la incorporación de mecanismos simples, mantenimiento celular, inhibición por sustrato o producto, y rendimientos variables, enriquece la retroalimentación y puede generar oscilaciones sostenidas. Matemáticamente, este cambio se explica mediante una bifurcación de Hopf: al variar un parámetro de control (por ejemplo, la concentración de sustrato en la alimentación  $S_{in}$ ), un par de valores propios complejos del equilibrio cruza el eje imaginario, el equilibrio pierde estabilidad y nace una órbita periódica estable (ciclo límite). En la Sección 2 iniciamos con el quimiostato como modelo base y discutimos sus limitaciones. En la Sección 3 presentamos un modelo extendido con mantenimiento celular, rendimiento  $Y(S)$  y cinética tipo Haldane (para capturar inhibición a altas concentraciones). Mostramos que el sistema pierde estabilidad mediante una bifurcación de Hopf, subcrítica en nuestro ejemplo. Al superar el umbral de Sin, emergen oscilaciones sostenidas a través de un pliegue de ciclos. Finalmente, en la Sección 4

presentamos simulaciones numéricas representativas (series de tiempo y retrato de fase del ciclo límite), junto con observaciones prácticas para operación y control.

## MODELOS MATEMÁTICOS

### Modelo no estructurado simple

El punto de partida clásico en biotecnología para describir un cultivo continuo (*quimiostato*) es el modelo no estructurado, que se basa en balances de materia para la biomasa y el sustrato. En su forma más simple está dado por:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= \mu(S)X - DX, \\ \frac{dS}{dt} &= D(S_{in} - S) - \frac{\mu(S)}{Y}X, \end{aligned} \quad (12)$$

donde  $X(t)$  es la concentración de biomasa (g/L), indicador del crecimiento celular en el biorreactor;  $S(t)$  es la concentración de sustrato limitante (g/L) en el medio que indica el consumo por las células;  $D$  es la tasa de dilución ( $\text{h}^{-1}$ ),  $S_{in}$  es la concentración de sustrato en la alimentación de medio fresco (g/L);  $Y$  es el rendimiento de biomasa respecto al sustrato consumido (g biomasa/g sustrato), y  $\mu(S)$  es la velocidad específica de crecimiento ( $\text{h}^{-1}$ ), que a menudo se modela con la cinética de Monod:

$$\mu(S) = \mu_{\text{máx}} \left( \frac{S}{K_S + S} \right). \quad (13)$$

siendo  $\mu_{\text{máx}}$  la velocidad específica de crecimiento máxima y  $K_S$  la constante de semisaturación.

Este modelo supone que la población microbiana es homogénea y que el

rendimiento  $Y$  es constante. En estas condiciones, las soluciones típicamente convergen a un único punto de equilibrio estable, sin la aparición de oscilaciones sostenidas, ver la Figura 3. Por sí solo, este modelo no explica los fenómenos dinámicos complejos observados experimentalmente, como oscilaciones, pulsos o biestabilidad. Para capturar este tipo de comportamientos es necesario introducir elementos adicionales al modelo, tales como: (i) términos de mantenimiento celular; (ii) inhibición por metabolitos (productos); (iii) rendimientos variables dependientes de condiciones ambientales y (iv) interacciones físicas o de transporte no ideales.

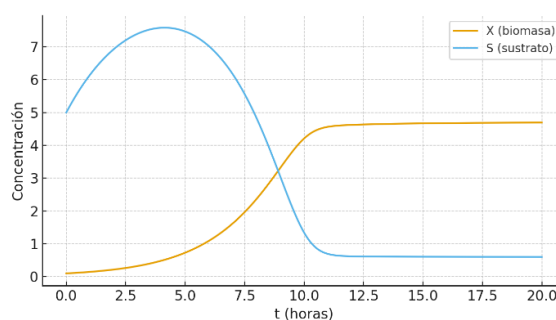


Figura 3: Gráficas de un cultivo continuo. Aquí los parámetros son: sustrato inicial  $S(0) = 5$  g/L, biomasa inicial  $X(0) = 0,1$  g/L,  $\mu_{\text{máx}} = 0,8$   $\text{h}^{-1}$ , constante de saturación  $K_S = 1,0$  g/L, rendimiento biomasa/sustrato  $Y = 0,5$ , tasa de dilución  $D = 0,3$   $\text{h}^{-1}$  y concentración de entrada de sustrato  $S_{in} = 10$  g/L.

Cuando el modelo básico de quimiostato (1) se amplía con mecanismos como mantenimiento celular, rendimientos variables o inhibición por metabolitos, el panorama cambia drásticamente. Lo que antes era un punto de equilibrio estable se convierte, en determinadas condiciones, en un sistema capaz de oscilar de manera espontánea.

El caso más simple es el del rendimiento variable con el sustrato, donde  $Y$  ya no

es constante, sino que depende de  $S$ . Esto refleja el hecho de que las células no siempre convierten el sustrato en la reacción con la misma eficiencia: factores tales como el estrés metabólico o el exceso de sustrato pueden modificar esa eficiencia. Al introducir esta dependencia en el modelo, se altera la estabilidad del equilibrio y, si la variación es suficientemente marcada, aparece una bifurcación de Hopf: el equilibrio pierde estabilidad y surge un *ciclo límite*, es decir, una órbita periódica estable visible en el plano de fases  $S$  vs  $X$ . En esta situación, las concentraciones de biomasa y sustrato oscilan de forma mantenida, repitiendo un patrón temporal característico. Para una descripción más formal de la bifurcación de Hopf, se remite al lector al apéndice y al libro de Perko [8].

Un segundo caso en el que se pueden presentar oscilaciones es cuando se considera el mantenimiento celular, que representa el consumo de sustrato para funciones vitales distintas al crecimiento. Aunque su formulación matemática es simple, su efecto es significativo: desplaza la región de operación hacia un régimen donde las oscilaciones son posibles y, a menudo, amplía el intervalo de tasas de dilución en el que se observan.

Ivanitskaya *et al.* [7] propusieron una visión más general: consideran clases completas de modelos de segundo orden con pequeñas modificaciones del *quimiostato* básico y muestran que, independientemente de los detalles, las oscilaciones tienden a aparecer en una trayectoria bien definida del plano  $(D, S_{in})$ . Esta trayectoria se puede identificar gráficamente y permite predecir, sin resolver las ecuaciones, en qué condiciones un cultivo continuo podría presentar oscilaciones.

## Modelo no estructurado extendido

Para capturar las oscilaciones observadas experimentalmente, una opción sencilla es ampliar el modelo básico incorporando (i) un término de muerte celular  $k_d$  y uno de mantenimiento celular  $m$ ; y (ii) un rendimiento  $Y$  que depende de la concentración de sustrato  $S$ . La velocidad específica de crecimiento puede incluir además inhibición por sustrato en el caso de la ecuación de Haldane. Un modelo típico que introduce las variaciones anteriores está descrito por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= (\mu(S) - D - k_d)X \\ \frac{dS}{dt} &= D(S_{in} - S) - \frac{\mu(S)}{Y(S)}X - mX\end{aligned}\quad (14)$$

La velocidad específica de crecimiento puede modelarse con cinética de Haldane para incluir inhibición a altas concentraciones de sustrato:

$$\mu(S) = \mu_{\text{máx}} \left( \frac{S}{K_S + S + \frac{S^2}{K_I}} \right) \quad (15)$$

donde  $K_I$  es la constante de inhibición por sustrato. El rendimiento se asume variable con el sustrato de la forma:

$$Y(S) = Y_0 + Y_1 S \quad (16)$$

con  $Y_0$  el rendimiento basal y  $Y_1$  la sensibilidad del rendimiento a la concentración de sustrato.

Para investigar por qué un cultivo continuo puede entrar en un comportamiento oscilatorio (de subidas y bajadas regulares) de biomasa y sustrato, es necesario identificar el

momento exacto en que el sistema deja de ser estable y comienza a oscilar: en el lenguaje de la dinámica de sistemas, este cambio se conoce como *bifurcación de Hopf*. Detectarla en el modelo extendido no sólo señala el umbral a partir del cual aparecen las oscilaciones, sino que también permite interpretarlas en términos del proceso real: condiciones de operación en las que las interacciones entre crecimiento, consumo y mantenimiento generan un patrón repetitivo y predecible, tal como se ha observado en experimentos con cultivos continuos.

En la siguiente sección realizaremos este análisis para el modelo descrito por las ecuaciones (14)-(16), determinando las condiciones en las que surge la bifurcación de Hopf y caracterizando el comportamiento dinámico asociado para ciertos valores de los parámetros.

## RESULTADOS

### Puntos de equilibrio, estabilidad y bifurcación de Hopf

En el caso del modelo extendido, denotamos  $x = (X, S)$  y su espacio fase está definido como:

$$X = \{x \in \mathbb{R}^2 : X \geq 0, S \geq 0\},$$

pues tanto la biomasa como el sustrato son cantidades no negativas. Bajo estas condiciones físicas, todas las trayectorias del sistema permanecen en la región positiva del plano fase.

El punto de equilibrio positivo de (14) es:

$$E^* = (X^*, S^*) = \left( \frac{D(S_{in} - S^*)}{\frac{D + k_d}{Y(S^*)} + m}, S^* \right), \quad (17)$$

Donde

$$S^* = \frac{K_1(\mu_{\max} - (D + k_d)) + \sqrt{-4K_S K_1(D + k_d) + K_1(D + k_d - \mu_{\max})^2}}{2(D + k_d)}. \quad (18)$$

Nótese que, en  $E^*$ , la condición de balance celular

$$\mu(S^*) = D + k_d$$

fija el sustrato residual  $S^*$ ; es decir, la tasa específica de crecimiento iguala las pérdidas por dilución y muerte celular. En consecuencia, definimos la tasa específica de consumo de sustrato (conocida como relación de Pirt) como

$$q_S^* = \frac{D + k_d}{Y(S^*)} + m, \quad (19)$$

donde  $\frac{D + k_d}{Y(S^*)} + m$  representa la demanda asociada al crecimiento y  $m$  al mantenimiento no asociado al crecimiento (homeostasis, bombas iónicas, reparación y recambio celular, etc.).

Con ello,

$$X^* = \frac{D(S_{in} - S)}{q_S^*}. \quad (20)$$

es decir, la biomasa sostenida en equilibrio es el flujo neto de sustrato realmente consumido dividido entre la demanda específica de sustrato por unidad de biomasa. Metabólicamente,  $\frac{D + k_d}{Y(S^*)}$  cuantifica el sustrato canalizado a síntesis de biomasa (para compensar dilución y muerte celular), mientras que  $m$  recoge los requerimientos energéticos basales de mantenimiento. En consecuencia,  $X^*$  aumenta con  $S_{in}$  y con el rendimiento  $Y(S^*)$ , y disminuye al incrementarse  $m$ ,  $k_d$  o  $D$  (este último suele elevar  $S^*$  y reducir la conversión).

Para determinar su estabilidad lineal calculamos la matriz jacobiana

$$J = \begin{pmatrix} \mu(S) - (D + k_d) & \mu'(S) \\ -\frac{\mu(S)}{Y(S)} - m & -D - X \frac{\mu'(S)Y(S) - \mu(S)Y'(S)}{Y(S)^2} \end{pmatrix}, \quad (21)$$

evaluada en  $(X^*, S^*)$ , donde  $' = d/dS$ . A partir de estas expresiones se obtiene

que la traza y el determinante de la matriz jacobiana, al evaluar en el punto de equilibrio, son:

$$\text{tr } J = -D - \frac{\mu'(S^*)}{Y(S^*)} X^* + \frac{(D + k_d)Y'(S^*)}{Y(S^*)^2} X^* \quad (22)$$

$$\det J = -\mu(S^*)X^* \left( \frac{D + k_d}{Y(S^*)} + m \right) \quad (23)$$

donde

$$\mu(S) = \mu_{\text{máx}} \left( \frac{S}{K_S + S + \frac{S^2}{K_I}} \right)$$

y

$$\mu'(S) = \mu_{\text{máx}} \left( \frac{K_S + \frac{S^2}{K_I}}{\left( K_S + S + \frac{S^2}{K_I} \right)^2} \right)$$

Como vimos antes, los valores propios  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  de la matriz  $J(X^*, S^*)$  determinan el tipo de comportamiento que presenta el sistema en torno al equilibrio. El teorema de Hartman-Grobman (véase [8]) asegura que, siempre que el equilibrio  $E^*$  sea hiperbólico (es decir, que ningún valor propio tiene parte real cero), la dinámica local (es decir, en una vecindad del equilibrio  $E^*$ ) es cualitativamente equivalente a la del sistema linealizado. En este marco, es posible clasificar de manera precisa las distintas situaciones que pueden ocurrir alrededor del equilibrio:

1. Si  $\det J < 0$ , el equilibrio  $E^*$  es un *punto silla*: es inestable pues, aunque algunas trayectorias tienden hacia él, al menos una dirección conduce al alejamiento.
2. Si  $\det J > 0$  y  $\text{tr } J < 0$ , el equilibrio  $E^*$  es *estable*: cualquier pequeña perturbación se atenúa con el tiempo y el sistema retorna al estado estacionario.

3. Si  $\det J > 0$  y  $\text{tr } J > 0$ , el equilibrio  $E^*$  es *inestable*: incluso perturbaciones mínimas hacen que las trayectorias se alejen progresivamente de este estado.

Ya que el modelo (14)-(15) considera cinética de Haldane, existe una condición muy concreta para que el equilibrio pueda volverse inestable y dar paso a oscilaciones, lo cual ocurre cuando la concentración de sustrato en equilibrio  $S^*$  supera un valor umbral relacionado con  $K_S$  y  $K_I$ . Cuando se cumple esta condición y, además, la traza de  $J(X^*, S^*)$  es exactamente cero, ocurre en la *bifurcación de Hopf*, es decir, el equilibrio deja de ser estable y aparece un ciclo repetitivo, conocido como *ciclo límite*. En un biorreactor continuo, esto significa que las concentraciones de biomasa y sustrato empiezan a oscilar de manera regular.

De aquí que, para determinar las oscilaciones sostenidas, debemos considerar:

$$\det J > 0 \iff \mu'(S^*) < 0 \iff \sqrt{K_S K_I},$$

donde existe la bifurcación de Hopf cuando:

$$\det J > 0, \quad \text{tr } J = 0$$

En particular, si  $Y$  es constante:

$$\text{tr } J = -D - \frac{\mu'(S^*)}{Y} X^* = 0 \iff X^* = \frac{DY}{-\mu'(S^*)}, \mu'(S^*) < 0.$$

En conclusión, el análisis teórico muestra que el modelo extendido puede perder estabilidad a través de una bifurcación de Hopf, dando lugar a oscilaciones sostenidas. Para ilustrar de manera concreta este fenómeno y observar su manifestación en las trayectorias del sistema, en la siguiente sección se presenta un ejemplo numérico representativo.

### Análisis numérico de la bifurcación de Hopf

El ejemplo numérico de esta sección complementa el análisis teórico al mostrar que la concentración de sustrato en la alimentación,  $S_{in}$ , actúa como parámetro de bifurcación. Al variar  $S_{in}$ , el sustrato en estado estacionario  $S^*$  cambia y el equilibrio puede perder estabilidad, dando lugar a oscilaciones sostenidas en las concentraciones de biomasa y sustrato. Desde el punto de vista biológico, este parámetro refleja la disponibilidad externa de sustrato: valores bajos mantienen al sistema en régimen estacionario, mientras que valores más altos pueden ocasionar que  $S^*$  rebase el umbral  $\sqrt{K_S K_I}$  y, consecuentemente, inducir un comportamiento oscilatorio. A continuación, se presenta la simulación de modelo (14)-(16), que ilustra cómo los cambios en  $S_{in}$  modifican la dinámica del reactor, mostrando con datos y figuras el comportamiento antes, en y después de la bifurcación de Hopf. En lo que sigue se describen los parámetros elegidos y se muestran de manera visual los escenarios que permiten apreciar, paso a paso, la transición desde un régimen estable hacia oscilaciones sostenidas.

Los parámetros cinéticos y operativos considerados son representativos de un cultivo microbiano en un reactor continuo o quimiostato, con cinética de Haldane (inhibición por sustrato) y rendimiento celular dependiente de la concentración de sustrato:

$$K_S = 0,317 \text{ g/L}, \quad K_I = 6 \text{ g/L}, \quad \mu_{\text{máx}} = 0,909 \text{ h}^{-1},$$

$$Y(S) = 0,147 + 0,653S, \quad D = 0,506 \text{ h}^{-1},$$

$$k_d = 0,0138 \text{ h}^{-1}, \quad m = 0,139 \text{ h}^{-1}$$

Con estos valores, la dinámica se resolvió mediante integración numérica utilizando un método de Runge-Kutta adaptativo de orden 4 (véase [4]), partiendo de condiciones iniciales cercanas al equilibrio. Posteriormente

exploramos distintos valores de  $S_{in}$  con el propósito de identificar el punto crítico de Hopf y analizar el comportamiento del reactor en ambos lados de la bifurcación.

### Ubicación de la bifurcación de Hopf

Aplicando el teorema 1, vemos que los valores propios de la matriz jacobiana (3), evaluada en el equilibrio  $E^*$ , resultan ser un par de imaginarios puros

$$\lambda_{1,2} = \pm 0,5418485691i,$$

lo que indica que la bifurcación de Hopf ocurre exactamente para

$$S_{in}^{\text{Hopf}} = 2,0362393414 \text{ g/L}$$

$$S^* = 0,4732193469 \text{ g/L},$$

$$X^* = 0,6184216391 \text{ g/L}.$$

con frecuencia  $\omega = 0,5148485691 \text{ rad/h}$  (período  $\approx 11,6 \text{ h}$ ). El cálculo del primer coeficiente de Lyapunov arrojó  $\ell_1 = 0,17784822516$ , lo que confirma que se trata de una bifurcación de *Hopf subcrítica*, en la cual la órbita periódica aislada o ciclo límite asociado es inestable; para mayores detalles ver el Apéndice. Este tipo de bifurcación implica que, al cruzar el umbral, el sistema “salta” directamente a oscilaciones de gran amplitud, sin una fase intermedia de oscilaciones de pequeña amplitud.

En términos sencillos, una bifurcación de Hopf *subcrítica* significa que, justo en  $S_{in}^{\text{Hopf}}$ , se alcanza el umbral de  $S^* = \sqrt{K_S K_I}$ , y nace una oscilación muy pequeña pero inestable; no se sostiene por sí sola. Sin embargo, las simulaciones evidencian la existencia de un ciclo límite externo y estable para  $S_{in} > S_{in}^{\text{Hopf}}$ , consistente con un pliegue de ciclos en una vecindad pequeña del punto de equilibrio; al cruzar el umbral, la dinámica salta hacia ese ciclo estable. Esta oscilación

grande no se detecta con el análisis local del equilibrio porque es un efecto global de la no linealidad (lo que en términos técnicos se llama un “pliegue de ciclos”, es decir, una colisión entre dos oscilaciones). Por eso, al aumentar  $S_{in}$  más allá del umbral, la trayectoria no se queda en la oscilación pequeña (inestable), sino que salta directamente a la oscilación grande y estable. El resultado observable es un cambio brusco: de un régimen estacionario se pasa, súbitamente, a oscilaciones sostenidas de gran amplitud, y puede aparecer biestabilidad e histéresis en un rango de parámetros.

Se consideraron tres escenarios representativos para explicar mejor la bifurcación de Hopf (ver Figuras 4 y 5):

1) *Antes de Hopf* ( $S_{in} = 1.55$  g/L): el equilibrio es estable; las perturbaciones iniciales generan oscilaciones transitorias que se amortiguan hasta alcanzar un estado estacionario. En términos operativos, el reactor mantiene condiciones constantes tras un breve ajuste.

2) *En Hopf* ( $S_{in} = 2.0362393414$  g/L): se observan oscilaciones de amplitud casi constante, reflejo de la condición crítica en la que el equilibrio está al borde de perder estabilidad. Este punto marca la transición entre régimen estable y régimen oscilatorio.

3) *Después de Hopf* ( $S_{in} = 3.8$  g/L): el sistema presenta un ciclo límite estable con oscilaciones sostenidas de gran amplitud y periodo regular (Figura 5). Interpretándolo en un contexto biotecnológico, este comportamiento podría generar variaciones periódicas en la concentración de biomasa y sustrato, afectando el rendimiento y la productividad del biorreactor.

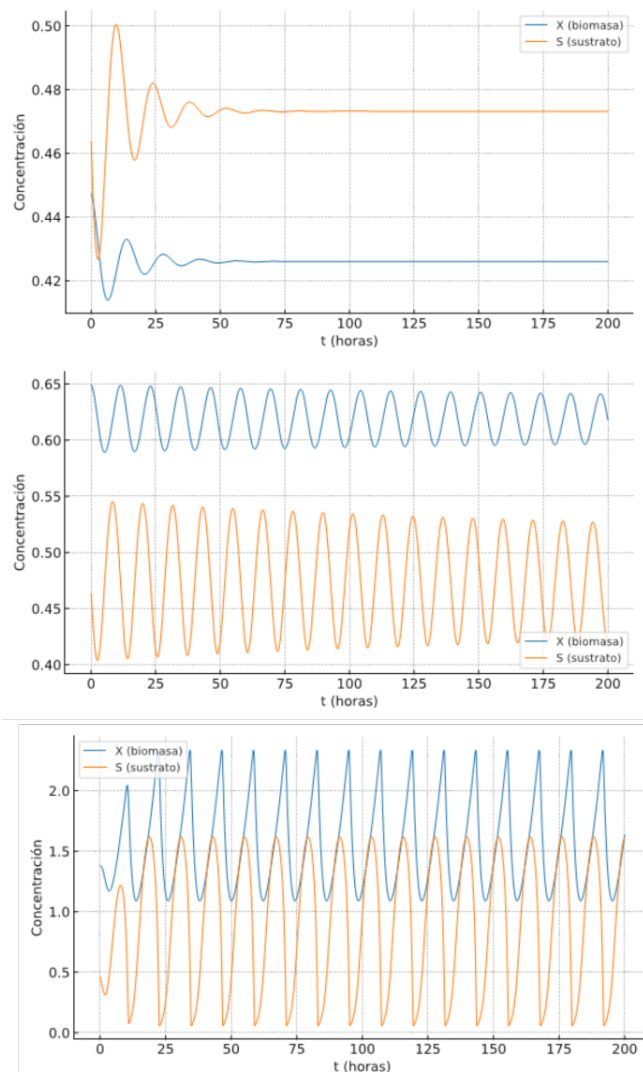


Figura 4: Variaciones de sustrato y biomasa respecto al tiempo antes, en y después de la bifurcación de Hopf para el modelo extendido. (Arriba)  $S_{in} = 1.55$  g/L con condiciones iniciales  $X(0) = 0.4473399219$  g/L y  $S(0) = 0.4637559599$  g/L: oscilaciones amortiguadas hacia el equilibrio. (Centro)  $S_{in} = 1.68$  g/L con condiciones iniciales  $X(0) = 0.6493437211$  g/L y  $S(0) = 0.4637559599$  g/L: oscilaciones casi neutras en el umbral crítico. (Abajo)  $S_{in} = 3.8$  g/L y condiciones iniciales  $X(0) = 1.3820823613$  g/L y  $S(0) = 0.4637559599$  g/L: oscilaciones sostenidas (ciclo límite estable).

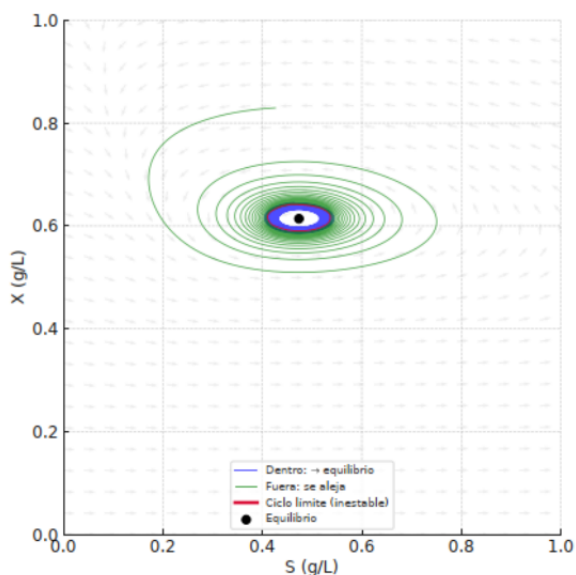


Figura 5: Retrato de fase del ciclo límite inestable en el plano  $(S, X)$  para  $S_{in} = 2.0362393414$  g/L y punto de equilibrio  $(X^*, S^*) = (0.6493437211, 0.4637559599)$  g/L.

## DISCUSIÓN

El análisis numérico muestra que pequeñas variaciones en la concentración de sustrato en el medio fresco pueden inducir cambios drásticos en la dinámica del reactor. En la práctica, operar cerca de una bifurcación de Hopf implica un alto riesgo de entrar en oscilaciones sostenidas, las cuales pueden: (i) Provocar estrés periódico en los microorganismos, afectando su metabolismo (ii) Alterar la productividad y el rendimiento del proceso y (iii) Dificultar el control de calidad del producto.

Las oscilaciones de las concentraciones de biomasa y de sustrato generan un microambiente estresante en los microorganismos que crecen en un quimiostato. En ciertos instantes las células se encuentran con altas concentraciones de sustrato e instantes después se encuentra con bajas concentraciones de sustrato. Esto afecta la velocidad de consumos de sustrato y

en consecuencia la generación de energía necesaria para el crecimiento celular.

Microorganismos como *Escherichia coli* o *Saccharomyces cerevisiae* responden ante este tipo de estímulos ambientales cambiantes. Por ejemplo, en condiciones de altas concentraciones de glucosa, la bacteria *Escherichia coli* manifiesta el fenómeno de *sobre flujo de carbono* en la ruta metabólica encargada de asimilar y transformar ese sustrato. Como resultado, el exceso de carbono se redirige a otras vías, lo que conduce a la producción y secreción de ácidos orgánicos tóxicos para la célula, como el acetato y el ácido fórmico [10]. A causa de esto, el pH del medio baja y disminuye la velocidad del crecimiento bacteriano. Por otro lado, cuando el sustrato disminuye debido a las oscilaciones, las bacterias son capaces de metabolizar el acetato y utilizarlo como fuente de energía, aunque no para crecimiento celular. Estos eventos se repiten cíclicamente por las oscilaciones generando un estrés fisiológico y metabólico a la bacteria.

En el caso de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, se sabe que en condiciones de alta concentración de glucosa se presenta el efecto conocido como *Crabtree*, en el cual se produce y secreta etanol al medio de cultivo, que es un subproducto parcialmente oxidado, aún en condiciones aerobias; donde se esperaría una oxidación completa de la glucosa [11]. Esta desviación del carbono hacia un subproducto de fermentación disminuye el rendimiento de biomasa respecto al sustrato  $Y$ , además de que el etanol en altas concentraciones es tóxico para la levadura. Cuando la concentración de sustrato disminuye por las oscilaciones, la velocidad de crecimiento también disminuye, pero no así la concentración de etanol

en el medio, generando un ambiente estresante y tóxico para las células.

## CONCLUSIONES

De lo anterior, vemos que las oscilaciones en un quimiostato tienen gran impacto en el metabolismo y la fisiología de los microorganismos. Sin embargo, saber que se presentan oscilaciones no es suficiente para comprender el fenómeno y poder generar una estrategia de acción para controlar el sistema y así evitar los efectos negativos. El estudio de la bifurcación para identificar los parámetros que ocasionan estos cambios abruptos y encontrar sus umbrales, es de gran importancia desde el punto de vista biotecnológico, pues permite comprender con mayor profundidad las interacciones no lineales del sistema y generar estrategias de acción para diseñar sistemas de control adecuados que permitan estabilizar el quimiostato. Estos resultados subrayan la necesidad de un control fino de las condiciones de operación, en particular de  $S_{in}$  y, en caso de ser necesario, también de  $D$ , para evitar operar cerca del umbral (manteniendo  $S^* < \sqrt{K_S K_I}$  y así prevenir regímenes oscilatorios no deseados.

En el modelo extendido, la concentración de sustrato en la alimentación  $S_{in}$  es el *parámetro de bifurcación* que desplaza el equilibrio  $(X^*, S^*)$  hacia la región inhibitoria de la cinética de Haldane. Al aumentar  $S_{in}$ , puede ocurrir que  $\mu'(S^*) < 0$  (equivalentemente,  $S^* > \sqrt{K_S K_I}$ ) y el equilibrio pierda estabilidad cuando  $\text{tr}J(X^*, S^*) = 0$  con  $\det J(X^*, S^*) > 0$ , esto es, en el punto  $S_{in}^{\text{Hopf}}$ . El signo positivo del primer coeficiente de Lyapunov

( $\ell_1 > 0$ ) indica una *Hopf subcrítica*: el ciclo que nace en el umbral es inestable; sin embargo, para  $S_{in} > S_{in}^{\text{Hopf}}$  puede existir un *ciclo límite externo y estable*

(típicamente vía un pliegue de ciclos) al que la dinámica *salta* al cruzar el umbral. El resultado es una transición brusca desde un régimen estacionario a oscilaciones de gran amplitud, con posibilidad de biestabilidad e histéresis en un intervalo de parámetros.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Juan S. Aranda Barradas por la revisión crítica de la versión preliminar del trabajo escrito.

## Referencias

- [1] A. Suichi, A. E. Humprey. (1973) "Biochemical Engineering," *Academic Press*, pp. 128-162.
- [2] J. E. Bailey, D. F. Ollis. (1983) "Biochemical Engineering Fundamentals," *McGraw Hill*, pp. 545-550.
- [3] A. Ajbar and K. Alhumaizi. (1997) "On the existence of oscillatory behavior in unstructured models of bioreactors," *Mathematical Biosciences*, vol. 143, no. 1, pp. 1-25.
- [4] R. L. Burden and J. D. Faires. (2011) *Numerical Analysis*. 9th edition, Brooks/Cole, Cengage Learning.
- [5] R. Freter, G. V. Stauffer, D. Cleven, L. V. Holdeman, and W. E. C. Moore. (1983). "Oscillations in Continuous Cultures of Microorganisms: Criteria of Utility of Mathematical Models," *Journal of Theoretical Biology*, vol. 95, no. 2, pp. 297- 323. doi: 10.1016/0022-5193(83)90247-5.
- [6] J. Guckenheimer, P. Holmes: *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*. (1993). Applied

- Mathematical Sciences, vol. 42, Springer-Verlag.
- [7] L. N. Ivanitskaya, A. V. Malygin, and E. E. Sel'kov. (1989) Oscillations in continuous cultures of microorganisms: a general theoretical approach. *Journal of Theoretical Biology*, 141(4):499–511.
- [8] L. Perko. (2001). *Differential Equations and Dynamical Systems*. Springer, New York, 3rd edition.
- [9] I. A. Yegorov, F. Mairet, and D. Dochain. (1997). “On the existence of oscillatory behavior in unstructured models of bioreactors,” *Mathematical Biosciences*, vol. 143, no. 1, pp. 1–25. doi: 10.1016/S0025-5564(97)00021-2.
- [10] J. Bafna-Rührer, Y. D. Bhutada, J. V. Orth, S. Ozmerih, L. Yang, D. Zielinski and S. Sudarsan. (2024). “Repeated glucose oscillations in high cell-density cultures influence stress-related functions of *Escherichia coli*,” *PNAS Nexus*, vol. 95, no. 3, pp. 376–389. doi: <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae376>.
- [11] L. Gibart, R. Khoodeeram, G. Bernot, J. Comet, J. Trosset. (2021). “Regulation of Eukaryote Metabolism: An Abstract Model Explaining the Warburg/Crabtree Effect,” *Processes*, vol. 9, no. 3, pp. 1496–1532. doi: <https://doi.org/10.3390/pr9091496>.



# La Química de los Productos Naturales: ¿qué es y para qué nos sirve?



**Dr. José Antonio Guerrero Analco**

Laboratorio de Química de Productos Naturales, Red de Estudios Moleculares Avanzados, Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz

**Dra. Cecilia I. Mayo Montor**

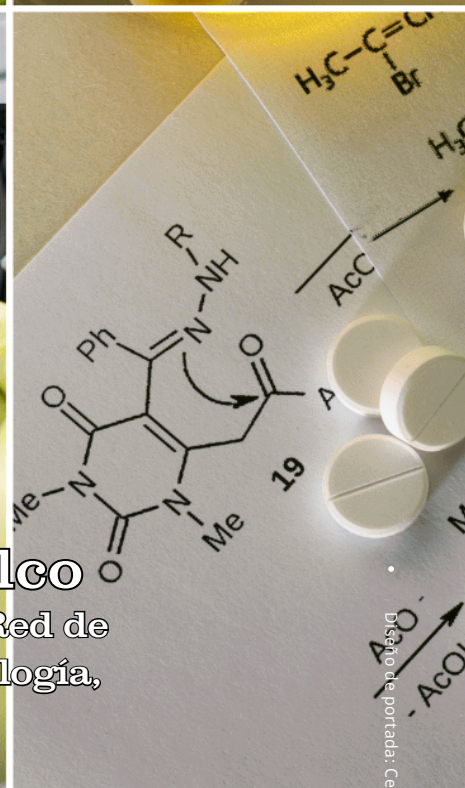
Laboratorio de Química de Productos Naturales, Red de Estudios Moleculares Avanzados, Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz

**Dr. Rafael Salgado Garciglia**

Laboratorio de Biotecnología Vegetal, Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.

**Dr. Juan Luis Monribot Villanueva**

Laboratorio de Química de Productos Naturales, Red de Estudios Moleculares Avanzados, Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz



## Abstract

This article aims to present to the general public the existence of a scientific discipline that, throughout history, has allowed us not only to understand the interactions (at a chemical level) and relationships existing between all living beings (including bacteria, fungi, plants, and animals), but also how humans have taken advantage of this knowledge for their benefit, thus obtaining medicines, agrochemicals and fertilizers for crops, food supplements, cosmeceuticals, nutraceuticals, among other value-added products from nature itself. This is all thanks to the research and technological development work in Natural Products Chemistry. However, before getting to it, let us define some fundamental concepts to understand better what it is and what it is used for.

**Keywords:** organic chemistry, biochemistry, specialized metabolites, bioactive natural compounds

## Resumen

Este artículo tiene el objetivo de presentar al público en general la existencia de una disciplina científica que, a lo largo de la historia, ha permitido no sólo entender las interacciones (a nivel químico) y relaciones existentes entre todos los seres vivos (incluyendo a las bacterias, los hongos, las plantas, y los animales), sino también, cómo el ser humano ha aprovechado este conocimiento para su propio beneficio, obteniendo así medicinas, agroquímicos y fertilizantes para los cultivos, suplementos alimenticios, cosmeceúticos, nutraceuticos, entre otros productos de valor agregado a partir de la naturaleza misma. Todo esto, gracias al trabajo de investigación y desarrollo tecnológico que se realiza en la Química

de Productos Naturales. Sin embargo, antes de llegar a ella, definamos algunos conceptos fundamentales que nos permitan entender mejor qué es y para qué nos sirve.

**Palabras clave:** química orgánica, bioquímica, metabolitos especializados, compuestos naturales bioactivos

## La Química como ciencia exacta

La química, como lo aprendimos desde nuestra educación básica (secundaria o preparatoria), se define como la ciencia que estudia la composición y transformación de la materia, entendiendo que todo lo que existe en el universo está compuesto por materia, y esta a su vez por moléculas, elementos, y átomos. La diversidad de componentes que constituyen a la materia es tan compleja que, para estudiarla, la química se ha dividido en distintas ramas especializadas como la Química Inorgánica, Química Orgánica, Química Analítica, Fisicoquímica, entre otras (Ilustración 1). Para los fines de este artículo nos centraremos en aquella que estudia los elementos que constituyen la base de la vida, y que por ende están presentes en todos los seres vivos. Nos referimos a la Química Orgánica, rama que estudia las moléculas formadas por elementos como el carbono (C), el hidrógeno (H), el oxígeno (O), el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el azufre (S), por mencionar a los más importantes. Por definición, un compuesto orgánico es aquel que contiene enlaces covalentes entre dos átomos de carbono y/o entre un átomo de carbono y uno de hidrógeno (Habtemariam, 2023). De esta manera, moléculas como el ácido acético presente en el vinagre ( $CH_3COOH$ ), el etanol ( $CH_3CH_2OH$ ) y la glucosa ( $C_6O_6H_{12}$ ) son ejemplos comunes de compuestos químicos orgánicos. A su vez, este mismo

grupo de elementos puede combinarse entre sí dando lugar a estructuras más complejas, y de esta forma obtener los más de trescientos mil compuestos

químicos distintos que se conocen en los diferentes seres vivos.

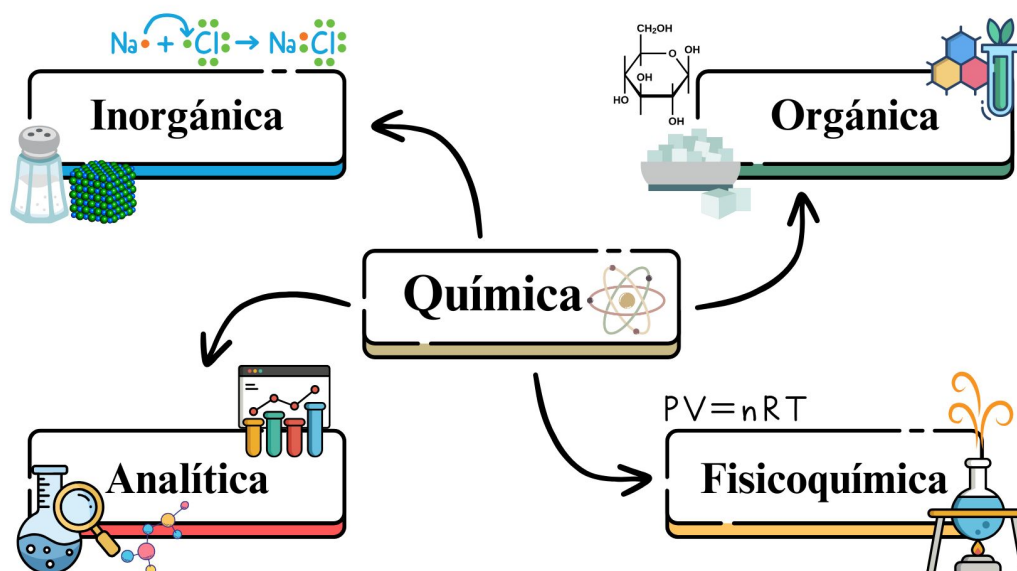


Ilustración 1: La Química se divide en ramas especializadas para estudiar con mayor profundidad a la materia, a los elementos químicos que la conforman y a los procesos que experimenta (creada en <https://www.canva.com>).

### De la Química Orgánica a la Bioquímica

Los avances científicos originados en la Química Orgánica permitieron estudiar las funciones biológicas desde un punto de vista celular, lo que dio origen a otra disciplina conocida como Biología Química, o de forma más resumida, Bioquímica, cuyo objetivo es comprender el funcionamiento y la naturaleza de los organismos vivos a nivel molecular (Fantini y Yahí, 2015). Los seres vivos estamos constituidos por células, las cuales se consideran como la unidad más pequeña de la vida. Entre todos los compuestos orgánicos presentes ellas, los ácidos nucleicos, formados a partir de moléculas más pequeñas conocidas como nucleótidos, contienen la información genética de cada organismo. Existen dos tipos: el ácido desoxirribonucleico (ADN), en el que se encuentran codificadas todas

las características de un individuo, y el ácido ribonucleico (ARN), el cual entre sus funciones se encarga de transmitir las instrucciones contenidas en el ADN. Cada una de las características en un individuo (por ejemplo, en los seres humanos, el color del cabello y de los ojos) proviene de una región específica dentro del ADN llamada gen. Posteriormente, mediante un proceso de transcripción, la información de los genes es reinterpretada para producir diferentes cadenas de ARN que se encargan de llevar el mensaje codificado originalmente en el ADN. Por último, el mensaje en forma de ARN es transformado, o traducido, en un producto final muy importante: una proteína. Al proceso global mediante el que se obtiene una proteína a partir de un gen presente en el ADN se le llama flujo de la información genética, y es

indispensable para que los seres vivos puedan crecer, reproducirse y también sobrevivir en el ambiente.

Para que las células lleven a cabo estos procesos requieren organizarse en estructuras como tejidos y órganos, además de producir energía. De forma similar a lo que observamos en un laboratorio, dentro de los seres vivos ocurren reacciones químicas. No obstante, estas suceden de forma simultánea e interconectadas en redes que se denominan rutas. Si realizáramos algunas de estas reacciones en un tubo de ensayo en el laboratorio, sería posible que tomaran mucho tiempo, sin embargo, al interior de los organismos vivos, estos procesos son acelerados por otro tipo de moléculas biológicas llamadas enzimas, las cuales pertenecen al grupo de las proteínas (cadenas formadas por sus unidades básicas, los aminoácidos). Gracias a las enzimas es posible llevar a cabo las reacciones bioquímicas millones de veces más rápido, en comparación con el tiempo que tomarían en ausencia de ellas. A la suma de todas las reacciones químicas que se realizan dentro un organismo se le conoce como metabolismo. Algunas de estas reacciones permiten transformar los nutrientes que obtenemos de los alimentos para producir adenosín trifosfato (ATP), un compuesto químico conocido como la moneda energética. Para ello es necesario descomponer moléculas complejas (por ejemplo, glucosa) en estructuras más sencillas (dióxido de carbono), lo que recibe el nombre de catabolismo. Al mismo tiempo también ocurren otras reacciones que, de forma inversa, permiten construir estructuras complejas (como las proteínas) a partir de moléculas pequeñas (aminoácidos), lo que se conoce como anabolismo. Algunos ejemplos puntuales de estos procesos incluyen

a la glucólisis (producción de energía a partir de glucosa), la beta-oxidación (producción de energía a partir de ácidos grasos), la gluconeogénesis (producción de glucosa a partir de sustancias que no son carbohidratos), la fosforilación oxidativa (producción de ATP), y la fotosíntesis (en plantas y hongos principalmente, producción de glucosa y oxígeno a partir de dióxido de carbono y agua, mediada por energía lumínica). Los compuestos orgánicos que participan como unidades fundamentales en estos procesos se conocen como metabolitos primarios, entre los que se encuentran los azúcares o carbohidratos, los ácidos grasos, los nucleótidos, y los aminoácidos (Judge y Dodd, 2020). Estos metabolitos se polimerizan, es decir, se unen formando cadenas de compuestos estructuralmente similares, para dar lugar al conjunto de biomoléculas que son compartidas por todos los seres vivos: los polisacáridos, lípidos, ácidos nucleicos, y proteínas (Ilustración 2). De aquí el nombre de metabolitos primarios, ya que no tienen restricción taxonómica y además se consideran esenciales para que los organismos cumplan sus funciones biológicas.

### **De la Bioquímica a la Química de los Productos Naturales**

Organismos como las plantas, hongos y bacterias, a la par de las biomoléculas fundamentales, que llamaremos metabolitos primarios, también producen compuestos que se separan química y estructuralmente de ellos, y que, además, pueden ser distintos entre especies del mismo género, familia, u orden taxonómico. Al conjunto de rutas metabólicas que dan lugar a estos nuevos tipos de compuestos químicos se le conoce como metabolismo secundario o especializado, y por lo tanto, sus productos son llamados metabolitos secundarios o especializados.



(combinación entre algunos de los anteriores) (Ilustración 3) (Sorokina y Steinbeck, 2020).

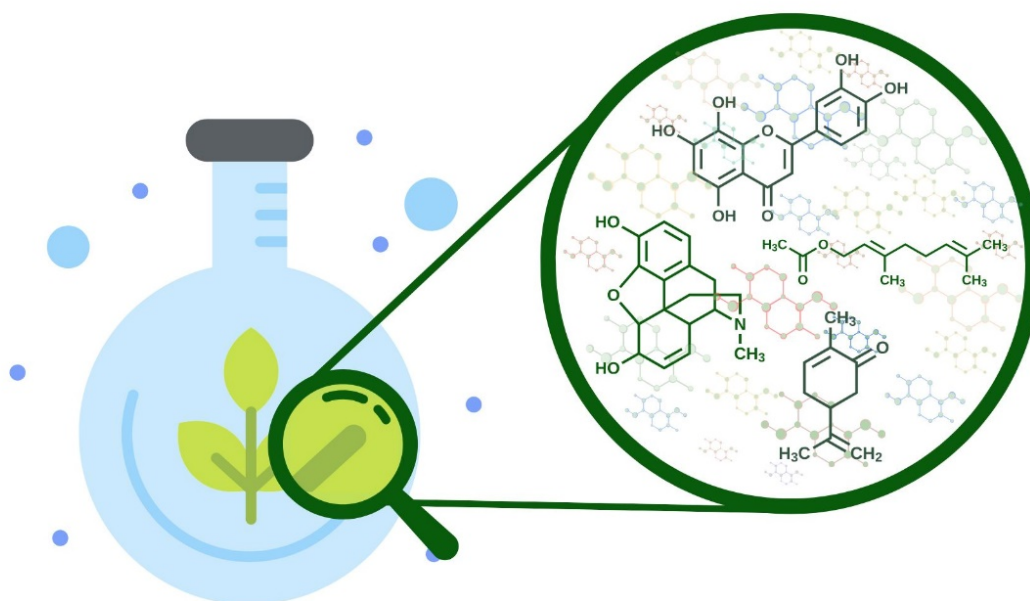


Ilustración 3: Algunos seres vivos, como las plantas, los hongos y las bacterias producen compuestos llamados metabolitos especializados que les permiten defenderse y competir con otros organismos, además de enfrentar daños ocasionados por el ambiente (creada en <https://www.canva.com>).

### La Química de los Productos Naturales y sus aplicaciones

La Química de los Productos Naturales es la disciplina científica que estudia el papel de los metabolitos secundarios o especializados tanto para el organismo que los produce como para su entorno. Los seres humanos hemos encontrado diferentes usos para los productos naturales, muchos de ellos aprovechando sus propiedades biológicas. Este estudio involucra el conocer cómo y por qué un organismo produce un determinado compuesto químico especializado, qué función cumple en él y qué posible uso puede tener si se obtiene en forma pura, o relativamente abundante en un extracto o fracción, entendiéndose como extracto o fracción a la mezcla ya sea compleja o simple de varios metabolitos.

A lo largo de la historia los productos naturales han sido de gran valor

para la humanidad, sobre todo por sus aplicaciones en la medicina debido a sus propiedades terapéuticas, a través del uso de las fuentes naturales que los contienen mediante la medicina tradicional. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la medicina tradicional constituye la suma de conocimientos, capacidades y prácticas basados en teorías, creencias y experiencias de diferentes culturas, sean explicables o no, utilizadas para mantener la salud y prevenir, diagnosticar, mejorar o tratar enfermedades físicas, mentales o de cosmovisión. Este conocimiento milenario heredado entre generaciones ha permitido el descubrimiento de muchas sustancias empleadas actualmente como fármacos (Che *et al.*, 2024). Por ejemplo, el paclitaxel, obtenido del árbol del tejo (*Taxus brevifolia*) y los alcaloides de la vinca (*Catharanthus roseus*),

vincristina y vinblastina, utilizados en la quimioterapia del cáncer; los antibióticos como las penicilinas obtenidas de cultivos de hongos del género *Penicillium*; y derivados de síntesis química como la progesterona, que se utiliza como anticonceptivo y que se obtiene por semisíntesis química a partir de la diosgenina (presente en plantas del género *Dioscorea*) (Cheuka *et al.*, 2017). Es tal la importancia de los productos naturales que se estima que cerca del 40% de los fármacos utilizados actualmente son o provienen de un producto natural, cuya fuente biológica original se utilizaba de manera tradicional (World Health Organization, 2023).

Por otro lado, aprovechando el efecto que estos compuestos poseen ecológicamente, los productos naturales también han permitido el desarrollo de agentes agroquímicos y biofertilizantes, los cuales se utilizan en el control de plagas y enfermedades que afectan cultivos de importancia económica. Entre estos se puede mencionar el aceite de Neem (*Azadirachta indica*) cuyo componente principal es la azadiractina; o las espinosinas obtenidas del cultivo bacteriano de *Saccharopolyspora spinosa*, que han mostrado tener efectos insecticidas muy eficaces. Del mismo modo, se han aislado e identificado numerosos microorganismos

(tanto hongos como bacterias) capaces de producir compuestos químicos conocidos como “fitohormonas”, entre las que destacan las auxinas (ácido indol acético y ácido indol butírico), las giberelinas, citoquininas, ácido salicílico, ácido jasmónico y ácido abscísico, que participan en el desarrollo, crecimiento, defensa y bienestar general de numerosas plantas de interés agronómico. Finalmente, muchos productos naturales presentes en distintas fuentes alimentarias y por sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antidiabéticas y anticancerígenas, han sido formulados como agentes nutraceuticos, o incorporados en suplementos alimenticios. Esto genera un valor agregado a los productos que contienen productos naturales y por lo tanto promueve su consumo. Por otro lado, existen compuestos químicos de origen natural que se utilizan convencionalmente en la elaboración de perfumes, condimentos, colorantes y saborizantes para las industrias cosmecéutica y alimentaria. Por ejemplo, los aceites esenciales, las grasas y aceites no esenciales, los compuestos fenólicos (flavonoides, antocianinas, fenilpropanoides), y vitaminas, por mencionar solo algunos (Ilustración 4) (Yan *et al.*, 2018).

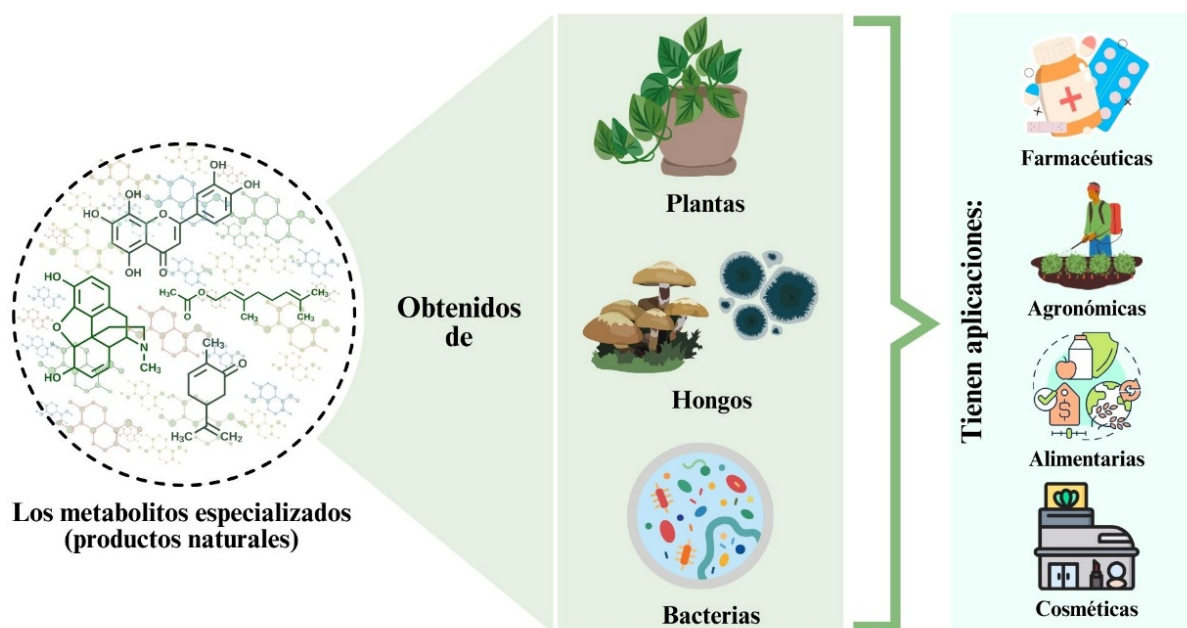


Ilustración 4: Los metabolitos especializados, o productos naturales, obtenidos de organismos como las plantas, hongos y bacterias son utilizados por los seres humanos para mejorar la salud, y la producción en la agricultura, así como para obtener productos alimenticios y cosméticos con valor agregado (creada en <https://www.canva.com>).

### Perspectivas

A pesar de todos los beneficios que se ha comprobado que aportan los productos naturales a distintos sectores de la sociedad, no todo es positivo en su investigación. Muchos descubrimientos se han realizado con especies presentes en estado silvestre, por lo que se requieren esfuerzos de conservación y propagación de estos recursos a fin de evitar un impacto ambiental y por lo tanto pérdida de la biodiversidad. Por otro lado, los metabolitos especializados bioactivos en la mayoría de las veces se encuentran en concentraciones bajas en su fuente natural, por lo que se requiere el empleo de otras estrategias de escalamiento para incrementar los rendimientos y facilitar su obtención de manera sistemática. Actualmente existe una pérdida importante de los recursos naturales (derivada del cambio climático), así como del conocimiento tradicional debido al aumento de la población mundial y la globalización.

Es por ello que invitamos a las nuevas generaciones a conocer áreas científicas multidisciplinarias como la Química de los Productos Naturales para que, además de descubrir un nicho de oportunidades de desarrollo académico y profesional, también adquieran conocimiento sobre las implicaciones ecológicas, terapéuticas y agronómicas de los metabolitos especializados. Esto con la finalidad de reconocer su valor histórico y contribución al bienestar de la población, para concientizarnos acerca de la necesidad de profundizar en su estudio, y de conservar a los organismos que los producen.

### Agradecimientos

J.A.G.-A. (CVU 43039) y C.I.M.-M. (CVU 942825) agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por el apoyo para la estancia sabática (No. 854285) y la beca nacional para estudios de posgrado, otorgados respectivamente.

## Referencias

- [1] Che, C. T., George, V., Ijiru, T., Pushpangadan, P., Andrae-Marobela, K. Chapter 2-Traditional medicine. En *Pharmacognosy*, Academic Press, Boston, pp.11-28, 2024. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18657-8.00037-2>.
- [2] Cheuka, P. M., Mayoka, G., Mutai, P. y Chibale, K., The role of natural products in drug discovery and development against neglected tropical diseases, *Molecules*, 22[1], pp.58, 2017. <https://doi.org/10.3390/molecules22010058>.
- [3] Fantini, J. y Yahi, N., Chemical Basis of Lipid Biochemistry. En *Brain Lipids in Synaptic Function and Neurological Disease*, Elsevier, Amsterdam, pp.1-28, 2015. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800111-0.00001-1>.
- [4] Clemensen, A.K., Provenza, F.D., Hendrickson, J.R. y Grusak, M.A., Ecological implications of plant secondary metabolites-phytochemical diversity can enhance agricultural sustainability, *Front. Sustain. Food Syst.*, 4, pp.547826, 2020. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.547826>
- [5] Habtemariam, S. Introduction to Organic Compounds and Covalent Bonding, En *Basic chemistry for life science students and professionals: introduction to organic compounds and drug molecules*, The Royal Society of Chemistry, pp.1-32, 2023. <https://doi.org/10.1039/9781839168086-00001>.
- [6] Judge, A. y Dodd, M. S., *Metabolism*, EB, 64, pp.607-647, 2020. <https://doi.org/10.1042/EBC20190041>.
- [7] Sorokina, M. y Steinbeck, C., Review on natural products databases: where to find data in 2020. *J. Cheminform.*, 12, pp.20, 2020. <https://doi.org/10.1186/s13321-020-00424-9>.
- [8] World Health Organization, 2023. Traditional medicine has a long history of contributing to conventional medicine and continues to hold promise. <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/traditional-medicine-has-a-long-history-of-contributing-to-conventional-medicine-and-continues-to-hold-promise> (fecha de acceso: 19-02-2025).
- [9] Yan, Y., Liu, Q., Jacobsen, S. E., y Tang, Y. The impact and prospect of natural product discovery in agriculture: New technologies to explore the diversity of secondary metabolites in plants and microorganisms for applications in agriculture, *EMBO rep.*, 19[11], pp.e46824, 2018. <https://doi.org/10.15252/embr.201846824>.

**Más allá de un instante.  
Memoria y no localidad en  
cálculo fraccionario**

$$\left( x^2 + y \right) dx \cdot dy$$
$$\cos(x+y) dx$$

**Dr. Jesús Enrique Escalante Martínez**

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,  
Universidad Veracruzana

**Dr. Porfirio Toledo**

Facultad de Matemáticas,  
Universidad Veracruzana

**Abstract**

Fractional calculus emerges as a natural extension of classical calculus, extending its ability to model phenomena that depend not only on the current state, but also on the past and the environment. Unlike traditional models, fractional derivatives allow for capturing memory and spatial non-locality effects. Using a literary metaphor, the text argues that many real-world processes cannot be understood without considering their history. Some historical origins of fractional calculus and its current applications in modeling physical and technological phenomena are discussed. The aim is to show how these mathematical tools offer a deeper and more flexible view of the world, in which memory and non-local influences play a fundamental role.

**Keywords:** fractional calculus, memory in dynamical systems, non-locality, modeling of complex phenomena.

**Resumen**

El cálculo fraccionario surge como una extensión natural del cálculo clásico, ampliando su capacidad para modelar fenómenos que dependen no solo de su estado actual, sino también del pasado y del entorno. A diferencia de los modelos tradicionales, las derivadas fraccionarias permiten capturar efectos de memoria y de no localidad espacial. A través de una metáfora literaria, el texto plantea que muchos procesos reales no pueden entenderse sin considerar su historia. Se abordan algunos orígenes históricos del cálculo fraccionario y sus aplicaciones actuales en la modelación de fenómenos físicos y tecnológicos. El objetivo es mostrar cómo estas herramientas matemáticas ofrecen una visión más profunda y flexible del mundo, en la que la memoria y las influencias no locales juegan un papel fundamental.

**Palabras clave:** cálculo fraccionario, memoria en sistemas dinámicos, no localidad, modelado de fenómenos complejos.

**¿Y si el pasado pudiera cambiar el destino?**

Hay una novela poco conocida, pero profundamente reveladora, llamada *La extraña vida de Iván Osokin*. (Ouspensky, 1947). En ella, el protagonista, abrumado por una vida llena de fracasos y arrepentimientos, acude a un mago que le concede un deseo inusual: volver al pasado, con todos sus recuerdos intactos, con la intención de enmendar errores y cambiar su destino. Pero ocurre algo inesperado: a pesar de saber lo que viene, Iván repite los mismos actos. Deja pasar las oportunidades, elige mal, y una vez más, fracasa. Al final, reconoce su impotencia para cambiar, convencido de que está condenado a un destino inalterable... , salvo que algún día logre tomar decisiones realmente conscientes. Aunque estas, claro está, podría tomarlas sin tener que viajar al pasado.

Una herramienta matemática muy utilizada para describir fenómenos en diversas áreas, como la biología, física, química, economía, etc., son las ecuaciones diferenciales ordinarias. De algún modo, estas ecuaciones se comportan como Iván Osokin: describen sistemas cuyo estado futuro depende únicamente del presente, sin posibilidad de corrección basada en el pasado. La evolución está fijada por un conjunto de reglas que actúan en un instante: no hay lugar para el recuerdo, ni para la historia.

Pero ¿qué ocurriría si un sistema pudiera *recordar*? Si, como Osokin, pudiera volver sobre sus pasos y

aprender del camino recorrido, ¿tendría una segunda oportunidad para cambiar de rumbo, a diferencia de nuestro protagonista? Los sistemas descritos por derivadas fraccionarias introducen esa posibilidad. No están atados a un destino rígido: son sistemas con memoria, capaces de integrar información del pasado en su evolución presente. Esta característica permite modelar con mayor realismo diversos fenómenos naturales, especialmente aquellos en los que el presente no puede explicarse sin una referencia a la historia del sistema. Gracias a ello, ofrecen la capacidad de adaptarse, reaccionar con mayor inteligencia y, en cierto sentido, escapar del determinismo clásico.



Figura 1: Interacción con un fluido no newtoniano mostrando su ruptura bajo tensión rápida. Wolfram Burner, Ripping Non-Newtonian Fluids, Flickr. Imagen licenciada bajo CC BY-NC 2.0.

En numerosas dinámicas de la naturaleza se encuentran evidencias de que el pasado influye en el devenir del sistema, de una forma que podríamos describir como un “efecto de memoria”. Este tipo de comportamiento se observa, por ejemplo, en los fluidos viscoelásticos: materiales que no solo fluyen como un líquido, sino que también almacenan energía como un sólido elástico.

Este tipo de dependencia histórica no

puede ser capturada adecuadamente por las ecuaciones diferenciales ordinarias, que suponen que el estado futuro de un sistema depende únicamente de su estado actual. En cambio, las ecuaciones diferenciales fraccionarias permiten incorporar memoria en su estructura matemática: sus derivadas no enteras se definen a través de integrales que “acumulan” información del pasado, ponderándola según su núcleo (kernel), el cual puede tener diversas formas.

Por otro lado, existen fenómenos que tampoco pueden describirse correctamente si asumimos que las interacciones son únicamente locales. En particular, a escalas astronómicas, la gravedad parece no comportarse según las leyes clásicas de Newton, a menos que se introduzca materia oscura como una hipótesis auxiliar. Sin embargo, una alternativa interesante es asumir que la gravedad misma tiene efectos no locales, es decir, que un punto del espacio puede influir a otro distante, sin necesidad de una interacción local. En este contexto, el uso de derivadas fraccionarias, en particular, aquellas definidas mediante la transformada de Fourier, permite modelar de forma coherente estos efectos a larga distancia (Borjón-Espejel *et al.*, 2022).

En ambos casos, ya sea por el recuerdo del pasado o por las influencias que viajan más allá de un entorno local, las derivadas fraccionarias se presentan como herramientas eficaces para capturar la complejidad de sistemas que la matemática clásica no logra describir por completo.

Una ecuación diferencial clásica describe cómo cambia una cantidad en función del tiempo o el espacio, utilizando derivadas de orden entero como la velocidad (primera derivada) o la

aceleración (segunda derivada). Estas derivadas se calculan a partir del comportamiento local de la función, es decir, dependen exclusivamente de su valor y variación en un punto específico. Por ejemplo, para predecir el futuro de un sistema mecánico, basta conocer su posición y velocidad actuales. No importa cómo llegó hasta allí, su pasado no influye. Este enfoque local funciona bien en muchos contextos, pero resulta insuficiente cuando la evolución del sistema depende de su historia o por efectos distribuidos en el espacio. Para esos casos, las ecuaciones diferenciales fraccionarias ofrecen un marco más adecuado y profundo para modelar la complejidad de la realidad.

### **Ecuaciones diferenciales fraccionarias. Una mirada más profunda al cambio**

La palabra “fraccionaria” puede sonar extraña en el contexto de las derivadas. Si una derivada de primer orden mide la velocidad de cambio, y una de segundo orden mide la aceleración, ¿qué significa una derivada de orden  $1/2$ ? ¿Qué tipo de cambio describe?

La idea detrás de una derivada fraccionaria es sorprendentemente natural, ya que generaliza el concepto clásico de derivada a órdenes no enteros. Esto implica que ya no se calcula a partir de la información puntual de una función, sino que incluye una especie de “promedio” del comportamiento pasado. Por esta razón, las derivadas fraccionarias están íntimamente relacionadas con la memoria: cuando se aplican en una ecuación, hacen que el futuro de un sistema no dependa solo del presente, sino también de su historia.

Podemos encontrar diversas definiciones de derivadas fraccionarias, como la

de Caputo o la de Riemann-Liouville; estas se expresan como integrales que acumulan el valor de la función en un intervalo pasado. Esta acumulación no es uniforme: depende de un *núcleo* (kernel) que asigna distintos pesos a los momentos previos, permitiendo modelar desde olvidos rápidos hasta memorias persistentes.

Pero la historia no termina en el tiempo: cuando la variable independiente representa el espacio, estas derivadas también introducen no localidad. En lugar de depender solo de valores cercanos (como lo hacen las derivadas ordinarias), las derivadas fraccionarias espaciales permiten que lo que ocurre en un punto esté influido por regiones lejanas.

### **Orígenes del Cálculo Fraccionario. Un viaje a los siglos XVII y XVIII**



Figura 2: Retrato de Gottfried Wilhelm Leibniz, por Francke, B. C. (ca. 1720). Museo Herzog Anton Ulrich, Brunswick, Alemania. Imagen en dominio público, Wikimedia Commons.

La semilla del cálculo fraccionario se plantó en 1695, en la correspondencia que sostenían Guillaume de L'Hôpital y Gottfried Leibniz. En relación con la derivada  $n$ -ésima de una función, se puede leer la siguiente pregunta: “¿Qué sucedería si  $n$  fuera  $1/2$ ?”. El mismo Leibniz respondió con optimismo: aunque admitió que parecía una paradoja, predijo que algún día se extraerían “consecuencias útiles” de esa idea. Así, sin saberlo, ambos estaban abriendo la puerta a un nuevo mundo matemático.



Figura 3: Retrato de Guillaume François Antoine, Marqués de L'Hôpital (1661–1704). Grabado realizado por Gérard Edelinck, basado en un diseño de Nicolas Fouché. Imagen de acceso abierto, por Wellcome Collection, bajo licencia CC BY 4.0.

Durante décadas, las derivadas fraccionarias fueron un ejercicio teórico. Hasta que, en 1823, el noruego Niels Henrik Abel las usó para resolver un problema físico fascinante: la tautócrona

(del griego “tiempo igual”). Este desafío, propuesto por Christiaan Huygens en el siglo XVII, consistía en encontrar una curva donde un objeto, al deslizarse sin fricción, tardara el mismo tiempo en llegar al fondo sin importar desde qué altura comenzara. La solución clásica era una cicloide, pero Abel abordó el problema desde otro ángulo.

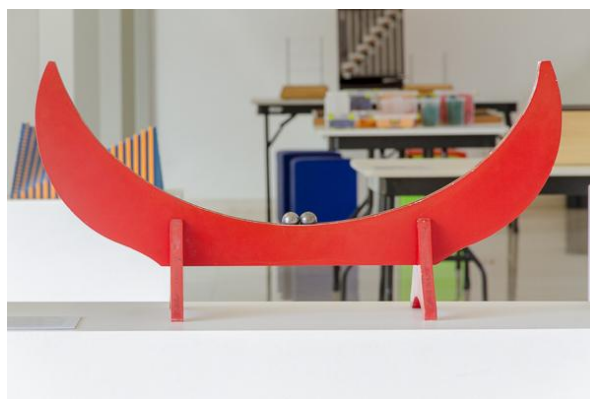


Figura 4: Representación física de una rampa tautócrona, diseñada con la forma de una cicloide invertida. Objetos que se deslizan desde distintos puntos alcanzan el extremo inferior en el mismo tiempo. Matemateca (IME-USP). Imagen licenciada bajo CC BY-SA 4.0.

Al modelar el tiempo de caída, Abel se topó con una ecuación integral que involucraba un término de la forma  $(x - t)^{(1/2)}$ . Sin saberlo, estaba usando una integral fraccionaria de orden  $1/2$ , un concepto que hoy asociamos con la derivada de Riemann-Liouville. Para resolverla, Abel aplicó una técnica revolucionaria: operó ambos lados de la ecuación con una “derivada fraccionaria” de orden  $1/2$ , simplificando el problema y demostrando que el cálculo fraccionario no era solo un desarrollo teórico, sino una herramienta práctica.

### Aplicaciones en el mundo real: ¿para qué sirve esto?

Las ecuaciones diferenciales fraccionarias no son solo un concepto curioso para matemáticos, son herramientas útiles

para entender fenómenos complejos del mundo real que desafían los modelos tradicionales. Algunos de los ejemplos más fascinantes provienen directamente de la naturaleza. Muchos sistemas biológicos y físicos —como las redes neuronales, el sistema cardiovascular, los árboles, los ríos y hasta las formaciones de nubes— comparten una propiedad sorprendente: su estructura se repite a diferentes escalas. A este patrón repetitivo se le llama *autosimilitud* o *estructura fractal*, y refleja un orden oculto en lo que a primera vista parece caótico. Es como si la naturaleza hablara en eco, repitiendo sus formas a distintas escalas, desde una ramita hasta un bosque entero. Capturar matemáticamente este tipo de organización no es sencillo, pero el cálculo fraccionario ofrece una forma elegante y poderosa de conectar la forma (estructuras fractales, materiales complejos) con el comportamiento (respuesta dinámica, difusión, amortiguamiento).



Figura 5: Corrosión anatómica de los pulmones de un ciervo rojo. La resina amarilla muestra la estructura interna de las vías aéreas tras la eliminación del tejido pulmonar circundante. Michael Frank, Corrosion cast of a red deer's lung, Royal Veterinary College. Imagen de acceso abierto, Wellcome Collection, bajo licencia CC BY 4.0.

Imagina el tejido pulmonar, en el sistema respiratorio, en donde las vías aéreas y los vasos sanguíneos en los pulmones no siguen una forma regular. Encontramos ramas que se dividen en ramas, que a su vez se vuelven a dividir, siguiendo patrones que se repiten de forma similar en diferentes niveles, ramificándose como árboles fractales. Lo mismo ocurre en el sistema circulatorio. Este tipo de geometría recursiva hace muy difícil construir modelos precisos usando ecuaciones comunes. El cálculo fraccionario permite establecer un vínculo entre la forma en que están organizadas estas estructuras y cómo funcionan dinámicamente, como si la forma misma determinara el comportamiento.

Las características anteriores no solo se observan en los organismos vivos. Algunos materiales diseñados por humanos también presentan efectos de memoriaz estructuras complejas. Es el caso de los materiales inteligentes, como los fluidos magnetorreológicos, que cambian su viscosidad cuando se les aplica un campo magnético (Escalante-Martínez *et al.*, 2020). Estos materiales se están utilizando, por ejemplo, en sistemas de aislamiento sísmico para proteger estructuras durante un terremoto.

Otro ejemplo notable lo encontramos en el mundo de la electrónica. En los circuitos eléctricos clásicos usamos resistencias, capacitores e inductores, cada uno con un comportamiento bien

definido. Sin embargo, al estudiar materiales complejos o dispositivos a microescala, se han encontrado componentes cuyo comportamiento no encaja del todo con estos modelos. A estos elementos se les conoce como fractancias, y se comportan como si tuvieran una combinación fraccionaria de capacitancia e inductancia (Gómez Aguilar *et al.*, 2016). Es decir, su respuesta depende no solo de la señal que reciben en ese instante, sino también de cómo ha variado esa señal en el pasado.

### Pensar el tiempo y el espacio de otra forma

Durante siglos, la matemática ha sido nuestra herramienta más precisa para describir el cambio. Las ecuaciones diferenciales de orden entero nos han ayudado a entender desde la caída de una manzana hasta la órbita de un planeta. Pero el mundo natural no siempre sigue caminos tan definidos. Hay sistemas que recuerdan, que acumulan historia, que están conectados a lo lejos. Frente a ellos, el lenguaje clásico puede no dar cuenta de su complejidad.


Las derivadas fraccionarias nos invitan a pensar los fenómenos dinámicos no como secuencias de eventos aislados, sino como tramas en la que el pasado puede influir de forma continua. Y el espacio, no como un conjunto de puntos independientes, sino como un tejido donde lo que ocurre en un lugar puede resonar en otro. Modelar con memoria y con no localidad es abrir la puerta a una comprensión más profunda, más coherente, más afín a la complejidad de los fenómenos reales.

Y así, volvemos a Iván Osokin. Como

él, muchos sistemas parecen estar atrapados en un destino fijo, repitiendo una y otra vez sus trayectorias. Pero, a diferencia de Osokin, que no lograba actuar diferente a pesar de recordar, los modelos fraccionarios ofrecen a los sistemas una posibilidad distinta: que la memoria no sea una condena, sino una herramienta para corregir y cambiar de rumbo. En este sentido, el cálculo fraccionario no es solo una extensión del cálculo clásico, sino una nueva forma de mirar el mundo. Una forma que reconoce que nada ocurre del todo aislado... ni del todo olvidado.

### Referencias

- [1] Borjón-Espejel, S., *et al.*, Newtonian gravity and MOND: a fractional Fourier approach, *Indian Journal of Physics*, 96[12], pp. 3405-3411, 2022. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12648-022-02296-1>
- [2] Escalante-Martínez, J. E., *et al.*, Fractional differential equation modeling of viscoelastic fluid in mass-spring-magnetorheological damper mechanical system, *The European Physical Journal Plus*, 135[847], pp. 1-14, 2020. <https://link.springer.com/article/10.1140/epjp/s13360-020-00802-0>
- [3] Gómez-Aguilar, J. F., *et al.*, Electrical circuits described by a fractional derivative with regular Kernel, *Revista Mexicana de Física*, 62[2], pp. 144-154, 2016. <https://rmf.smf.mx/ojs/index.php/rmf/article/view/4188>
- [4] Ouspensky, P. D., *La extraña vida de Iván Osokin*, Holme Press Inc., Nueva York, 1947.

A hand with a bloody wound and another hand with a bloody fingerprint. The background is dark, and the hands are the central focus, symbolizing violence and forensic evidence.

# **Emergencia silenciosa: aumento de la violencia familiar en mujeres en la Ciudad de México durante la pandemia COVID-19**

**Alejandra Galindo Cruz**

Alumna de Posgrado de la Especialidad de Medicina Forense  
Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Medicina  
Médico Auxiliar en las labores del Ministerio Público de la Fiscalía  
General de Justicia de la Ciudad de México

**M en C. María de la Luz Sevilla González**

Profesora de Posgrado del Instituto Politécnico Nacional  
Escuela Superior de Medicina del Instituto Politécnico Nacional

**Esp. Medicina Forense Erika Santana  
Hernández**

Instituto Politécnico Nacional  
Fiscalía General de Justicia de la Ciudad de México

## Abstract

Domestic violence against women represents a critical, persistent public health issue in Mexico, which was demonstrably exacerbated during the COVID-19 pandemic. Factors such as mandatory confinement, social isolation, and heightened economic stressors amplified existing coercive control dynamics, leading to a surge in gender-based violence reports. This pattern confirms domestic violence as a systemic outcome of deeply entrenched structural and cultural gender inequalities in Mexican society.

This study conducted a descriptive analysis of 210 police reports filed by women (aged 18–55) detailing physical violence with the Mexico City Prosecutor's Office specializing in Family Violence between 2021 and 2023. The majority of victims were concentrated within the 27- to 42-year-old cohort, a phase associated with peak productive and reproductive life and reflecting a heightened vulnerability profile.

The predominant educational attainment was secondary or high school, with homemakers and working women constituting the largest occupational groups. These data suggest a strong correlation between economic dependency, lower socioeconomic standing, and increased exposure to domestic violence.

The most frequent physical injuries documented were equimosis (bruising) and excoriations (scrapes). The distribution of injuries was statistically concentrated on the arms, hands, and face (specifically the nasal region). This location pattern is interpreted as evidence of active defensive posturing by the victims against physical subjugation. The results definitively confirm that

intrafamily violence is not an isolated phenomenon but an expression of profound structural and cultural inequalities.

Mitigating this crisis requires a robust policy response that necessitates the reinforcement of integral public policies informed by a gender perspective, expansion of institutional protection services, and assurance of specialized, multidisciplinary care—encompassing physical health, mental health support, and guaranteed access to justice. Only this comprehensive approach will effectively reduce violence and ensure the safety and autonomy of women.

**Keywords:** Intrafamily Violence, COVID-19 Pandemic, physical Injuries, Gender Inequality.

## Resumen

La violencia contra las mujeres dentro del hogar es un problema persistente en México que se agudizó de manera preocupante durante la pandemia de COVID-19, debido a factores como el confinamiento, el aislamiento social y las tensiones económicas que intensificaron las dinámicas de control. Esta violencia es una manifestación de desigualdades estructurales y culturales que persisten en la sociedad mexicana.

Este estudio analizó 210 casos de mujeres que denunciaron violencia física en la Fiscalía de Investigación del Delito de Violencia Familiar de la Ciudad de México entre 2021 y 2023. La mayoría de las víctimas se ubicaron en el rango de 27 a 42 años, etapa asociada a la vida productiva y reproductiva. Predominó la escolaridad secundaria y preparatoria, y en cuanto a ocupación, destacaron las amas de casa y mujeres trabajadoras.

Estos datos sugieren una relación con

contextos de desigualdad económica y social. Las lesiones más comunes fueron golpes y raspaduras (equimosis y excoriaciones), localizadas con alta frecuencia en brazos, manos y rostro. La localización de las lesiones en estas áreas se interpreta como evidencia de intentos de defensa y del sometimiento físico al que fueron expuestas las víctimas.

Los resultados confirman que la violencia intrafamiliar no es un fenómeno aislado, sino una expresión de desigualdades estructurales y culturales. Para revertir esta situación, es necesario fortalecer las políticas públicas con perspectiva de género, ampliar los servicios de protección y garantizar una atención especializada e integral que abarque salud física, mental y acceso a la justicia. Solo mediante un abordaje integral será posible reducir la violencia y garantizar la seguridad y autonomía de las mujeres.

**Palabras clave:** Violencia familiar, pandemia COVID-19, lesiones físicas, desigualdad de género.

### Introducción

La violencia contra las mujeres constituye un fenómeno estructural y persistente que trasciende fronteras, culturas y clases sociales. A nivel mundial, la **Organización de las Naciones Unidas** (ONU: 2025) reportó que más de 85 mil mujeres y niñas fueron asesinadas intencionalmente en 2023, reflejando la magnitud de una problemática que continúa siendo una de las más graves violaciones a los derechos humanos.

La muerte violenta por razones de género constituye el extremo de una cadena de agresiones físicas, psicológicas, sexuales, económicas y

simbólicas cuyo análisis demanda una perspectiva multidisciplinaria que articule la Medicina Forense, la Psicología y las Ciencias Sociales; en este marco, la pandemia de COVID-19 actuó como un factor amplificador, evidenciando las desigualdades estructurales y acentuando las dinámicas de control, aislamiento y violencia en el ámbito doméstico.

Más allá de su impacto sanitario, la pandemia de COVID-19 expuso una profunda crisis social marcada por el aislamiento, la ansiedad y la pérdida económica, factores que incrementaron la violencia intrafamiliar, especialmente contra las mujeres. El confinamiento y las desigualdades estructurales agudizaron las dinámicas de control y abuso, evidenciando que el COVID-19 no solo constituyó una emergencia de salud pública, sino también un espejo de las persistentes brechas sociales y de género en la sociedad mexicana.

Enfrentar esta realidad exige acciones integrales orientadas a la educación con perspectiva de género, el fortalecimiento institucional y la implementación efectiva de políticas públicas que garanticen el derecho de las mujeres a una vida libre de violencia.

### La pandemia de COVID-19: crisis global y repercusiones sociales

La pandemia de COVID-19 fue provocada por el SARS-CoV-2 y representó una de las mayores crisis sanitarias y sociales de la historia reciente. Declarada emergencia mundial por la OMS en marzo de 2020, afectó millones de vidas y evidenció la fragilidad de los sistemas de salud, así como la necesidad de respuestas globales coordinadas.

El virus, perteneciente a la familia

de los coronavirus, se transmite por gotas respiratorias y aerosoles, y su periodo de incubación promedio de 5 a 7 días, junto con la presencia de portadores asintomáticos, dificultó su control. Aunque la mayoría de los casos fueron leves, los adultos mayores y las personas con enfermedades crónicas enfrentaron las formas más graves de la enfermedad, lo que provocó el colapso de servicios hospitalarios y el abandono de tratamientos médicos esenciales (Acero Vidal, 2022).

### **Marco legal de la violencia en México y en el Mundo**

En México, la violencia contra las mujeres no es un fenómeno reciente, sino una manifestación histórica de la desigualdad de género y la impunidad institucional. De acuerdo con el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía: 2021), casi la mitad de las mujeres mayores de 15 años ha experimentado algún tipo de violencia, con mayor incidencia en contextos de pobreza, bajo nivel educativo y consumo de sustancias y fue el confinamiento de la pandemia cuando estas condiciones se agudizaron, incrementando los casos de violencia física, psicológica y sexual en los hogares.

La Convención sobre la Eliminación de Todas las Formas de Discriminación contra la Mujer (CEDAW), adoptada por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 1979, marcó un hito al reconocer la violencia de género como una violación de los derechos

humanos. En concordancia con este marco internacional, México promulgó la Ley General de Acceso de las Mujeres a una Vida Libre de Violencia el 01 de febrero de 2007, que establece mecanismos de prevención, atención, sanción y erradicación de la violencia, e incorpora la violencia familiar como delito en la legislación federal y estatal, consolidando así un avance significativo en la protección jurídica de los derechos de las mujeres.

A nivel global, la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2016) estima que una de cada tres mujeres ha sufrido algún tipo de violencia física o sexual a lo largo de su vida. En el contexto nacional, la Encuesta Nacional sobre la Dinámica de las Relaciones en los Hogares (ENDIREH, 2021) reporta que el 76.2% de las mujeres mexicanas ha experimentado violencia en algún momento de su vida, y que el 15% de las mujeres mayores de 15 años en la Ciudad de México sufrió violencia familiar durante el 2021, la cual el 66.1% ocurrió dentro del hogar.

También se establece que, en términos generales, el 46.1% de las mujeres reportó haber sufrido algún tipo de violencia psicológica, física, sexual, económica o patrimonial en los últimos doce meses. Las prevalencias más altas se registraron en el Estado de México (78.7%), la Ciudad de México (76.2%) y Querétaro (75.2%), lo que evidencia la persistencia y gravedad estructural de la violencia de género.



**DISTRIBUCIÓN DE MUJERES DE 15 AÑOS Y MÁS QUE HAN EXPERIMENTADO ALGUNA SITUACIÓN DE VIOLENCIA FÍSICA Y/O SEXUAL POR PARTE DE SU PAREJA A LO LARGO DE LA RELACIÓN POR LOS DAÑOS FÍSICOS DERIVADOS DE LA VIOLENCIA EXPERIMENTADA**

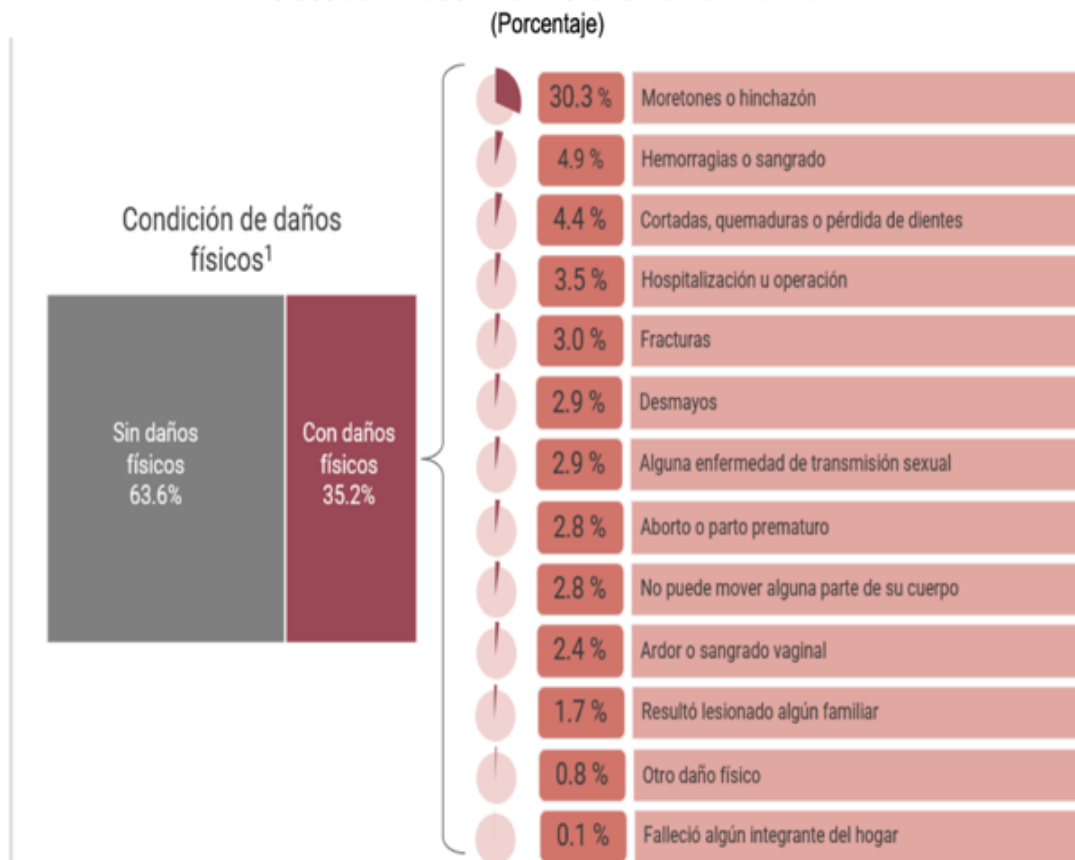


Figura 2: Referencia: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Encuesta Nacional sobre la Dinámica de las Relaciones en los Hogares (ENDIREH) 2021*. INEGI.

Durante los tres años analizados, la edad de las mujeres afectadas se concentró de manera consistente entre los 25 y 45 años, con una media de aproximadamente 34 años.

Este rango etario coincide con la etapa de mayor actividad laboral y familiar, en la que las mujeres asumen múltiples roles de cuidado, lo que las coloca en una posición de vulnerabilidad estructural ante la violencia doméstica; también durante estos tres años predominó la educación primaria, seguida de la secundaria, manteniendo el perfil socioeducativo vulnerable ya observado en años previos.

Este indicador refuerza la asociación entre bajo nivel educativo y limitaciones

en el acceso a redes de apoyo, protección jurídica y atención médica oportuna. No obstante, durante 2023 se observó un leve aumento de víctimas con escolaridad media superior, lo cual podría vincularse a una mayor disposición a denunciar y buscar atención médico-legal.

No se observaron variaciones significativas entre el número de casos de violencia física denunciadas entre los años, aunque en 2023 se registró una ligera disminución en el número de víctimas jóvenes, posiblemente relacionada con una mayor visibilización y denuncia de los casos en grupos de mayor edad.

Desde el punto de vista médico-forense,

en los tres años analizados, las regiones más comprometidas fueron la cara, el cuello y los miembros superiores, seguidas por el tórax anterior y posterior; estas áreas anatómicas corresponden a zonas de defensa y forcejeo, lo que indica intentos de resistencia durante la agresión. La persistencia de lesiones faciales subraya la dimensión simbólica del daño, al afectar la identidad y la imagen corporal de la víctima.

Las lesiones de tipo contuso principalmente equimosis y excoiaciones fueron las más comunes en ambos periodos, tanto de forma aislada como combinada. Este patrón refleja el uso de fuerza física directa y la recurrencia de mecanismos traumáticos múltiples, característicos de la agresión física reiterada dentro del ámbito familiar. La comparación entre periodos pandémico y postpandémico mostró en 2023 una ligera reducción en la severidad de las lesiones y un aumento en la visibilización de las denuncias, atribuible a la reactivación institucional y social. Sin embargo, la persistencia del fenómeno evidencia que la violencia familiar trasciende el

confinamiento y se mantiene alimentada por factores estructurales y culturales de desigualdad.

Con el término de las medidas restrictivas en 2023, se observó una leve disminución en la severidad de las lesiones y un incremento en su visibilidad y denuncia formal, lo que sugiere un efecto moderador del retorno a la vida pública y del acceso a instituciones de apoyo. En conjunto, los hallazgos demuestran que, aunque el fin de la pandemia redujo parcialmente la intensidad de las agresiones, la violencia física contra las mujeres persiste como un fenómeno estructural, cuya manifestación se adapta al contexto social más que desaparecer con él.

Este indicador refuerza la asociación entre bajo nivel educativo y limitaciones en el acceso a redes de apoyo, protección jurídica y atención médica oportuna. No obstante, durante 2023 se observó un leve aumento de víctimas con escolaridad media superior, lo cual podría vincularse a una mayor disposición a denunciar y buscar atención médico-legal.

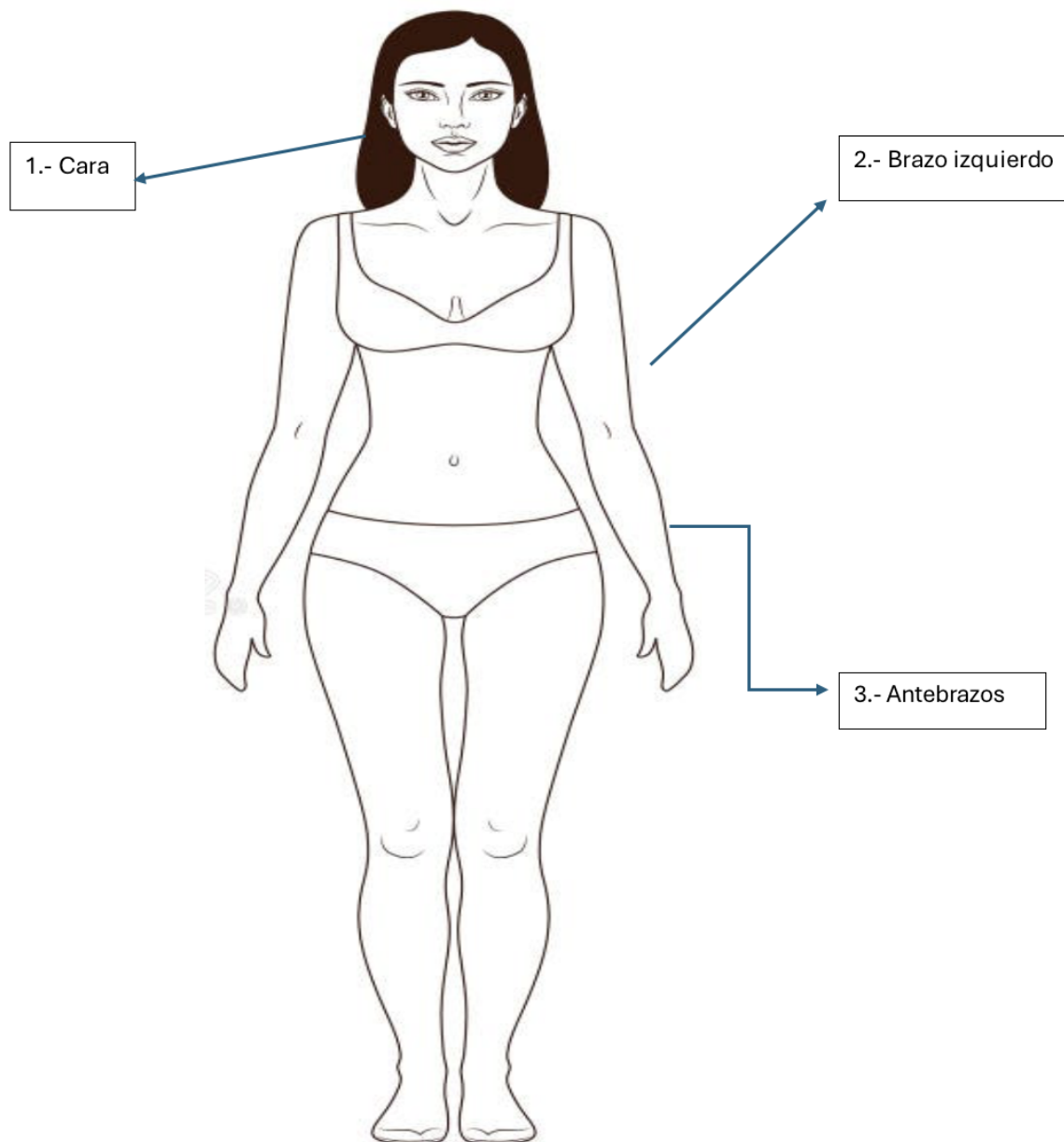


Figura 3: Este esquema representa las regiones anatómicas en donde se presentaron las lesiones físicas más frecuentes:

### CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio confirman que la violencia familiar contra las mujeres continúa siendo una de las problemáticas más relevantes desde la perspectiva médico-forense y de salud pública.

A lo largo del periodo analizado (2021–2023), las lesiones físicas se mantuvieron constantes tanto en su frecuencia como en su

gravedad, evidenciando que este fenómeno no es circunstancial ni dependiente del contexto sanitario, sino una manifestación estructural de desigualdad y violencia de género.

Con el término de la pandemia en 2023, se observó una ligera reducción en la severidad de las lesiones y una mayor visibilización de los casos, atribuible al restablecimiento de la movilidad, la reapertura institucional

y el fortalecimiento de los canales de atención. No obstante, la persistencia del fenómeno confirma que la violencia familiar trasciende los contextos de crisis sanitaria y se mantiene como una expresión estructural de desigualdad de género.

Desde el punto de vista médico-forense, la valoración de las lesiones en víctimas de violencia familiar requiere un enfoque integral y multidisciplinario, que considere tanto los hallazgos físicos como las repercusiones psicológicas y sociales. El perito médico-legal cumple una función esencial en la documentación objetiva del daño corporal y funcional, proporcionando evidencia científica que sustenta los procesos judiciales y contribuye a la procuración de justicia.

Los hallazgos de este estudio reafirman la necesidad de fortalecer los mecanismos institucionales de prevención, atención y acompañamiento a las mujeres víctimas de violencia, así como la formación continua del personal médico-forense en perspectiva de género y derechos humanos. Solo a través de una intervención interdisciplinaria y basada en evidencia será posible reducir la impunidad y avanzar hacia la erradicación de la violencia contra las mujeres.

En síntesis, la discusión de los resultados muestra que, aunque la pandemia de COVID-19 modificó temporalmente las dinámicas de convivencia y exposición al riesgo, la violencia familiar contra las mujeres persiste como un problema multifactorial y estructural. La Medicina Forense, al integrar ciencia, ética y justicia, se consolida como una herramienta indispensable para visibilizar el daño, fortalecer los procesos judiciales y contribuir a la protección

integral de la salud y la dignidad de las mujeres.

## DISCUSION

Los resultados de este estudio confirman que la violencia familiar contra las mujeres sigue siendo un problema persistente y relevante desde las perspectivas médico-forense y de salud pública. La constancia en la frecuencia y gravedad de las lesiones físicas durante el periodo 2021–2023 sugiere que este fenómeno no depende de contextos extraordinarios, como la pandemia de COVID-19, sino que refleja desigualdades de género estructurales y patrones de violencia profundamente arraigados en la sociedad.

El ligero descenso en la severidad de las lesiones y el aumento en la visibilización de los casos observado en 2023 podrían estar asociados con la reapertura institucional, la recuperación de la movilidad y el fortalecimiento de los canales de atención, lo que indica la importancia de la capacidad de respuesta institucional para reducir el riesgo y promover denuncias. Sin embargo, la continuidad del fenómeno demuestra que estas intervenciones no son suficientes por sí solas, enfatizando la necesidad de estrategias sostenidas y estructurales que aborden los factores socioculturales y económicos que perpetúan la violencia de género.

Desde la perspectiva médico-forense, este estudio reafirma la importancia de un abordaje integral y multidisciplinario. La documentación objetiva del daño físico y la evaluación de sus repercusiones psicológicas y sociales no solo fortalecen la evidencia científica en procesos judiciales, sino que también contribuyen a la visibilización del sufrimiento de las víctimas y a la

promoción de su protección integral.

El perito médico-legal desempeña, por tanto, un papel crítico en la articulación entre ciencia, ética y justicia, consolidándose como un actor indispensable en la lucha contra la impunidad y la violencia estructural.

Los hallazgos también destacan la necesidad de fortalecer los mecanismos institucionales de prevención, atención y acompañamiento, así como la capacitación continua del personal médico-forense en perspectiva de género y derechos humanos. La integración de enfoques interdisciplinarios —que incluyan Medicina Forense, Psicología, Trabajo Social y Derecho— se perfila como una estrategia clave para abordar la violencia familiar de manera integral y basada en evidencia.

Aunque la pandemia de COVID-19 modificó temporalmente las dinámicas de convivencia, la violencia familiar contra las mujeres continúa siendo un fenómeno multifactorial y estructural. La Medicina Forense se consolida como una herramienta fundamental para documentar el daño, apoyar la justicia y contribuir a la protección de la salud, la dignidad y los derechos de las mujeres, reforzando la necesidad de políticas sostenibles y estrategias de intervención basadas en evidencia y perspectiva de género.

La violencia familiar contra las mujeres persiste como una realidad dolorosa y estructural que trasciende contextos y épocas. Los resultados de este estudio confirman que, pese a los cambios sociales tras la pandemia, la frecuencia y gravedad de las agresiones físicas se mantienen, reflejando desigualdades de género profundamente arraigadas.

Desde la Medicina Forense, cada lesión documentada representa no solo evidencia científica, sino también la historia de una mujer que busca justicia y reconocimiento. El trabajo del personal médico-forense adquiere así un valor humano y ético al convertir el daño en verdad y visibilizar la dimensión social de la violencia.

En conjunto, los hallazgos subrayan la necesidad de fortalecer la prevención, la atención integral y la formación con perspectiva de género. Erradicar la violencia requiere una respuesta conjunta de la ciencia, la justicia y la sociedad, orientada a garantizar entornos seguros, justos y dignos para todas las mujeres.

## Referencias

- [1] De León Rosales, S. P., COVID-19: La gran pandemia de 2020, UNAM, 2020.
- [2] Dirección General de Comunicación Social UNAM, La violencia familiar puede escalar hasta el feminicidio, Boletín UNAM-DGCS, No. 898, octubre, 2021.
- [3] Fiscalía General de Justicia de la Ciudad de México, Informe de actividades de la Fiscalía General de Justicia de la Ciudad de México, 2022.
- [4] Gisbert Calabuig, J. y Villanueva Cañadas, E., Medicina legal y toxicología, 1.<sup>a</sup> ed., Elsevier Masson, 2008.
- [5] Gobierno de México, Ley General de Acceso de las Mujeres a una Vida Libre de Violencia, CONAVIM.
- [6] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Violencia contra las mujeres en México,

- s.f., <https://www.inegi.org.mx/tablerosestadisticos/vcmm/>
- [7] ONU Mujeres, Al cumplir 15 años, ONU Mujeres plantea 15 retos y soluciones para avanzar hacia la igualdad de género, ONU, 2025, <https://news.un.org/es/story/2025/07/1539976>.
- [8] Secretaría de las Mujeres CDMX, Boletín Mujeres CDMX, Año 3[11], noviembre, 2024.
- [9] Valdez-Santiago, R., Villalobos-Hernández, A. L., Arenas-Monreal, L., Flores, K. y Ramos-Lira, L., Violencia en el hogar contra mujeres adultas durante el confinamiento por la pandemia de COVID-19 en México, Salud Pública de México, 63[6], pp.782–788, 2021.
- [10] Vargas Alvarado, E., Medicina legal, 1.<sup>a</sup> ed., Trillas, 2000.

# Lucía del Pozo



**Lilith GM**

Pasante de la Licenciatura en Arte y Patrimonio Cultural.

En el pueblo todavía se habla de Lucía como si su historia hubiera quedado atrás. No porque se haya resuelto, sino porque se volvió repetitiva, perdiendo su filo con detalles estables para así tranquilizarse.

Así que este no es un cuento difícil de leer.

Eso es importante decirlo desde el inicio.

La historia de Lucía suele contarse de forma simple: una adolescente, un pueblo pequeño, un pozo antiguo y una madre muerta. Nada que no se haya leído antes. De hecho, probablemente ya reconoces los elementos. En torno a eso hubo versiones contradictorias, pero todas coincidían en lo esencial: cuando murió, nadie oyó gritos. El cuerpo apareció horas después y el pozo fue sellado. Ese es el inicio habitual del relato.

Se decía que, Lucía, poco después comenzó a caminar más despacio, como si contara los pasos y a veces se detenía sin motivo aparente. Otros decían que simplemente se quedaba quieta mientras apretaba los ojos, como si escuchara algo demasiado lejano para los demás. Lucía no decía que escuchara voces. Decía que recordaba sonidos. Eso era más aceptable. Nadie discute los recuerdos ajenos; recuerdos y sensaciones que al principio aparecían solo de noche.

Lo cierto es que la casa tenía una acústica particular. El sonido viajaba mal. Las duelas crujían principalmente cuando no había nadie más. Aun cuando bajaba las escaleras, se detenía.

Olvidaba por qué. Mientras cerraba los ojos y contenía la respiración, en su mente contaba los crujidos que súbitamente se detenían al contar hasta diecisiete... sonidos que se evaporaban sin aviso.

Respecto al pozo, no reflejaba nada. No el cielo. No la linterna. No el rostro inclinado sobre el brocal. Era un detalle que suele mencionarse en los relatos porque les resultaba inquietante que nadie supiera quién fue el primero en notarlo.

No de forma constante, Lucía rodeaba el pozo cuando no podía dormir, algo común a esa edad, solo que a veces regresaba a su habitación con las manos sucias y la ropa mojada. Dudaba, con la sensación de haber olvidado algo importante: un fragmento roto en su memoria en el que a veces retrocedía; otras veces pensaba que lo hacía, para luego descubrir que seguía en el mismo lugar.

La voz —si es que puede llamarse así—, es decir, el sonido que recordaba, no venía de abajo. No surgía del agua, sino de un punto indeterminado, como cuando una frase aparece en la cabeza antes de saber quién la dijo.

—No mires.

La noche en que desapareció no fue distinta. No hubo gritos ni violencia visible. Sin testigos. Al amanecer, solo una cinta de cabello flotando en el agua. Desde entonces, simplemente nadie se acerca al lugar a más de diecisiete pasos, como si el cuerpo recordara algo que la mente no considera relevante.

Sin embargo, quienes han leído sobre No mires.  
Lucía con atención notan algo más. No  
en el relato, sino después: un desajuste No hacia el pozo. No mires. No releas la  
en su mente, una extraña sensación de página.  
haber pasado demasiado tiempo en un  
punto específico del texto, como si algo No mires.  
necesitara ser leído dos veces... y al  
mismo tiempo les hubiera sugerido no Lucía tampoco supo identificar el  
hacerlo. momento exacto en que dejó de escuchar  
recuerdos.

No es una voz. No es una orden.  
No es una idea fugaz, ya que aparece sin Fue lo último que pensó antes de que  
que lo notes, sin aviso: nadie volviera a mirarla.

# Nanotecnología al rescate del agua: innovación en el tratamiento de aguas residuales

**Mtra. Gerdany Zúñiga Verdugo**

Departamento de Ciencias Básicas, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco.

**Dra. Mirella Gutiérrez Arzaluz**

Departamento de Ciencias Básicas, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco.

**Dra. Alejandra Montserrat Navarrete López**

Departamento de Ciencias Básicas, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco.

**Dra. Mónica Liliana Salazar Peláez**

Departamento de Ciencias Básicas, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco.

20  $\mu\text{m}$



*EHT = 15.00 kV*

*WD = 8.7 mm*

*Signal A*

*Mag = 5*

**Abstract**

Many innovative techniques have been developed to tackle the detrimental impacts of pollutants on the environment and human health. Among these, nanomaterials emerge as particularly remarkable due to their unique properties. Defined by their minuscule size, a carbon nanotube measuring just 1 nanometer in diameter would require 100,000 lined up to match the width of a single human hair. This tiny size confers remarkable properties upon nanomaterials, including high reactivity and efficiency, cost-effectiveness, straightforward synthesis, non-toxicity, biodegradability, and recyclability. Harnessing these exceptional properties, nanomaterials are making significant strides across various fields such as agriculture, electronics, medicine, sensors, and, notably, environmental remediation. Nanomaterials shine in the crucial wastewater treatment and recovery area by effectively eliminating various pollutants, including organic compounds, heavy metals, salts, and fine suspended particles. This fact positions them as a revolutionary solution for cleaning wastewater without resorting to harmful chemicals or excessive energy consumption. The transformative potential of nanomaterials will continue to expand as we tailor their applications to meet specific treatment needs, paving the way for a cleaner, healthier future.

**Keywords:** Emerging contaminants, Nanomaterials, Environmental remediation, Wastewater treatment.

**Resumen**

Se han desarrollado numerosas técnicas para mitigar los efectos perjudiciales de los contaminantes en el medio ambiente y la salud humana. Entre ellas, los nanomateriales resultan especialmente

destacables por sus propiedades únicas. Definidos por su minúsculo tamaño, se requerirían 100,000 nanotubos de un nanómetro de diámetro alineados para igualar el grosor de un cabello humano. Este diminuto tamaño confiere a los nanomateriales propiedades sobresalientes, como alta reactividad y eficiencia, rentabilidad, síntesis sencilla, no toxicidad, biodegradabilidad y reciclabilidad. Gracias a estas propiedades, la nanotecnología está logrando avances significativos en diversos campos, como la agricultura, la electrónica, la medicina, los sensores y, en particular, la remediación ambiental. Los nanomateriales destacan en el ámbito del tratamiento y la recuperación de aguas residuales, eliminando eficazmente diversos contaminantes, como compuestos orgánicos, metales pesados, sales y partículas finas en suspensión. Esto los posiciona como una solución revolucionaria para la depuración de aguas residuales sin recurrir a productos químicos nocivos ni a un consumo excesivo de energía. El potencial transformador de los nanomateriales seguirá expandiéndose a medida que adaptemos sus aplicaciones para satisfacer necesidades de tratamiento específicas, allanando el camino para un futuro más limpio y saludable.

**Palabras clave:** Contaminantes emergentes, Nanomateriales, Remediación ambiental, Tratamiento de aguas residuales.

**PEQUEÑA PERO PODEROSA...  
CÓMO LA NANOCIENCIA ESTÁ  
TRANSFORMANDO EL AMBIENTE**

Para entender cómo funcionan los nanomateriales es necesario adentrarnos en el asombroso mundo de la nanociencia, la cual se ocupa del estudio de la materia en tamaño

nanométrico, donde el nanómetro representa la mil millonésima parte de un metro. . . Si tuviéramos un nanotubo de carbono de 1 nanómetro de diámetro, necesitaríamos 100,000 unidades para llegar al espesor de un cabello humano (Figura 1).

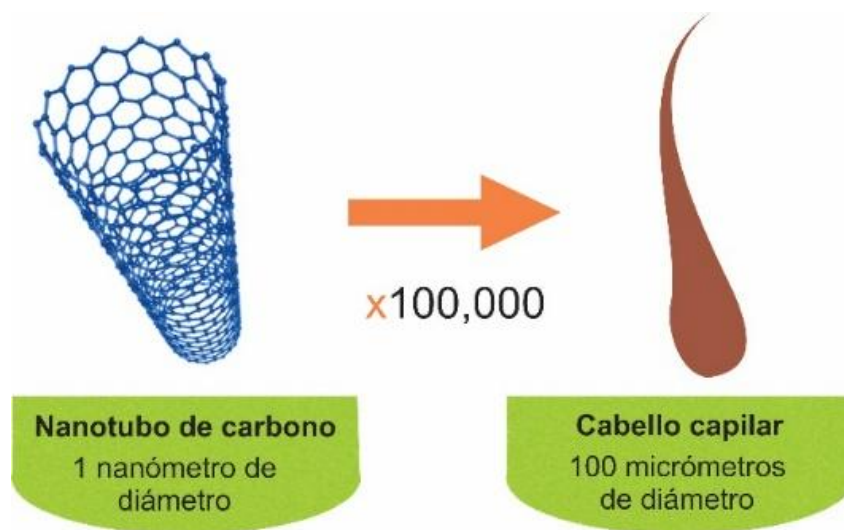


Figura 1: Diferencia de dimensiones entre un nanotubo de carbono y un cabello humano.

La nanotecnología se enfoca en la investigación de la manipulación de estos materiales para obtener propiedades de interés y los nanomateriales son aquellos que tienen tamaños menores a 100 nm (Tripathy *et al.*, 2024). Estos pueden tener diferentes formas y se pueden clasificar por su dimensión: Los de dimensión cero, 0D, son las nanopartículas (NP); los unidimensionales, 1D, son las nanobarras o nanotubos; los bidimensionales, 2D, son las películas y finalmente, los tridimensionales, 3D, son aglomeraciones en masa, como se ilustra en la Figura 2.

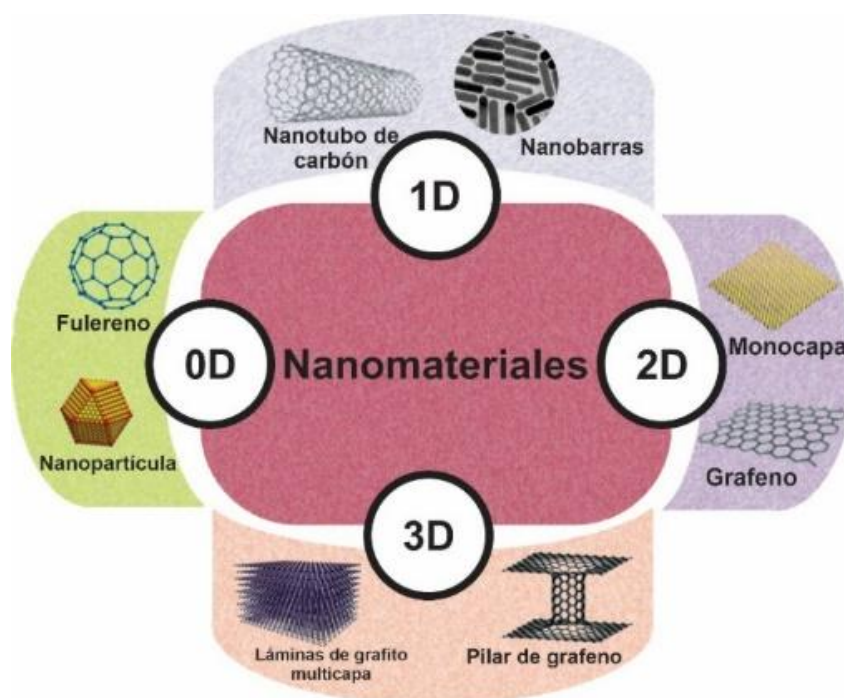


Figura 2: Nanomateriales clasificados por su dimensión

En general, al disminuir el tamaño de partícula se propicia el aumento de la cantidad de partículas en la superficie, promoviendo una mayor área de contacto (Altammar, 2023). Esta característica es importante porque las nanopartículas (NP) tienen una gran

relación superficie-volumen, obteniendo diferentes propiedades. Además de esta relación, sus propiedades varían dependiendo de su tamaño, composición química, morfología, porosidad, tamaño y estructura (Figura 3) (Ghongade & Vitthal, 2022).

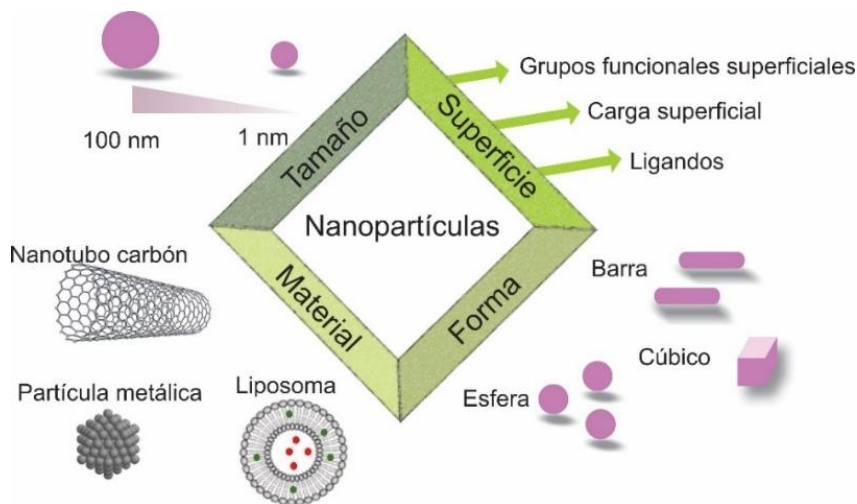


Figura 3: Propiedades de las nanopartículas

Teniendo en cuenta estas propiedades únicas de los nanomateriales, se han podido aplicar a diversas áreas como la agricultura, la electrónica, la medicina, los sensores y la remediación ambiental (Figura 4) (Singh *et al.*, 2020). Algunos ejemplos incluyen la liberación controlada de medicamentos

(medicina), pantallas flexibles y sensores (electrónica), generación de celdas solares y almacenamiento de energía (energía y sensores), pesticidas y fertilizantes (agricultura) purificación y tratamiento de aguas residuales (remediación ambiental) (Ghongade & Vitthal, 2022; Singh *et al.*, 2020).



Figura 4: Áreas de aplicación con nanopartículas

Esta última aplicación es de gran importancia, ya que uno de los problemas principales para la humanidad es la contaminación ambiental, donde continuamente se buscan nuevas tecnologías para afrontar esta problemática. Las partículas en suspensión, los metales pesados, los pesticidas, los herbicidas, los fertilizantes, los derrames de petróleo, los gases tóxicos, los efluentes industriales, las aguas residuales y los compuestos orgánicos son solo algunos ejemplos de los muchos contaminantes preocupantes y que se pueden tratar con NP (Guerra *et al.*, 2018).

Con respecto a la remediación ambiental, el tratamiento del agua es el área con mayor aplicación de nanomateriales. Esto se debe a la gran variedad de posibilidades que brindan, como la remoción de compuestos orgánicos disueltos, metales pesados, sales y partículas finas suspendidas. La nanoingeniería de materiales se puede

aplicar a todas las áreas de tratamiento del agua; sin embargo, se sigue explorando cómo disminuir sus costos (Tripathy *et al.*, 2024; Altammar, 2023).

### REMEDIACIÓN AMBIENTAL CON NANOTECNOLOGÍA: PEQUEÑAS SOLUCIONES PARA GRANDES PROBLEMAS

Los contaminantes pueden originarse por diversas actividades humanas o por desastres naturales y en muchas ocasiones representan una amenaza para el ambiente y la salud humana. Para mitigar sus efectos se han desarrollado diversas técnicas de remediación ambiental, cuyo objetivo no solo es restaurar los ecosistemas afectados, sino también prevenir la propagación de la contaminación y frenar la degradación ambiental (Ugrina y Jurić, 2023). Las técnicas convencionales para dicha remediación ambiental incluyen métodos biológicos, químicos y físicos (Figura 5).

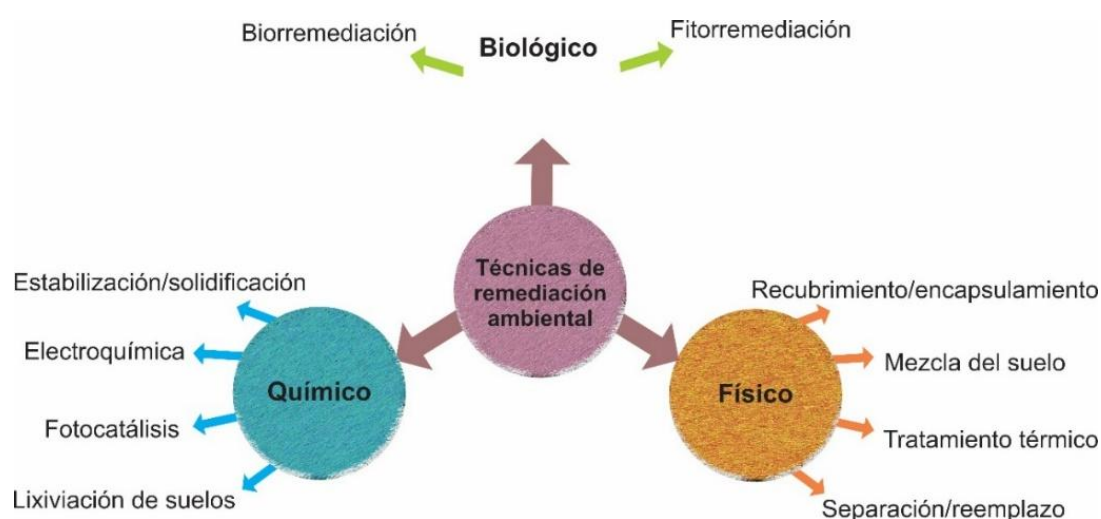


Figura 5: Técnicas de remediación ambiental.

La remediación biológica emplea agentes biológicos, como plantas o microorganismos, para reducir, eliminar o inmovilizar contaminantes mediante procesos como la fitorremediación y biorremediación. La remediación

química, por su parte, se aplica a suelos, cuerpos de agua y aire contaminados, utilizando agentes químicos y sustancias activas capaces de descomponer contaminantes. Entre sus principales técnicas se incluyen la

lixiviación de suelos, la electroquímica, la estabilización/solidificación y la fotocatalisis. Por último, la remediación física se emplea con mayor frecuencia a suelos contaminados y consiste en la eliminación de contaminantes a través de mecanismos físicos, como el recubrimiento/encapsulamiento del suelo, la separación/reemplazo, la mezcla y el tratamiento térmico (Ugrina y Jurić, 2023).

Si bien existen diversas técnicas de remediación para la remediación de entornos contaminados, la elección de la técnica adecuada es compleja y depende de múltiples factores, como la composición y concentración de contaminantes, los costos operativos, la eficiencia, la viabilidad, la aplicabilidad y el impacto ambiental final (Tripathy *et al.*, 2024; Ugrina y Jurić, 2023).

Recientemente ha surgido un interés en el uso de nanopartículas como nueva

tecnología de remediación química. Esto debido a que presentan una gran reactividad y eficacia, en comparación con otros materiales. Propiedades de los nanomateriales como la rentabilidad, la síntesis sencilla, la química ecológica, la no toxicidad, la biodegradabilidad, la reciclabilidad y su potencial reúso son claves para su aplicación en la remediación ambiental (Guerra *et al.*, 2018).

La nanotecnología tiene una amplia gama de aplicaciones para resolver los problemas involucrados en la remediación ambiental, debido a sus diferentes propiedades, como las ya mencionadas, que permiten su uso en el tratamiento de agua, suelo y aire, donde comúnmente se pueden usar en diferentes procesos como la adsorción o reacciones de reducción/oxidación, por mencionar algunos (Figura 6) (Singh *et al.*, 2020).

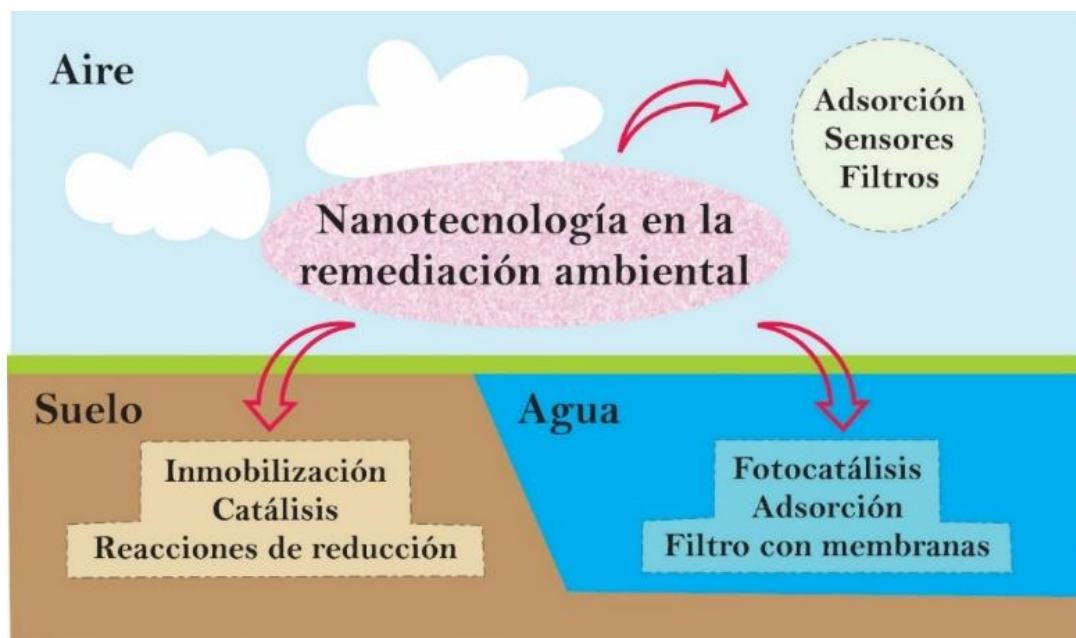


Figura 6: Aplicaciones de la nanotecnología en la remediación ambiental.

Dentro del área de aplicación de las NP en la remediación ambiental existen 3 categorías: 1) productos respetuosos con el medio ambiente, 2) remediación de

materiales contaminados con sustancias peligrosas y 3) sensores (Altammar, 2023).

En el caso de la categoría 1, se trata de la química verde. Pero ¿a qué nos referimos con este término? La química verde implica la elaboración de nanomateriales utilizando compuestos no tóxicos, sostenibles y que no representen un riesgo para el medio ambiente ni agraven los problemas ecológicos existentes. Se promueve el uso de recursos naturales renovables, minimizando al máximo el impacto ambiental relacionado a su producción (Altammar *et al.*, 2023).

En cuanto a la categoría 2, esta se enfoca en utilizar nanomateriales para la degradación eficiente y acelerada de contaminantes. Un ejemplo común es la remoción de metales pesados en agua o suelos, los cuales son difíciles de remover mediante tratamientos convencionales. En estos casos, los nanomateriales son una gran alternativa para este desafío (Altammar, 2023; Ghongade & Vitthal, 2022).

Por último, en la categoría 3 se encuentran los sensores, que son

dispositivos capaces de detectar estímulos en el entorno y responder de manera eficiente a ellos. Estos pueden estar diseñados para medir parámetros como temperatura, humedad o presión, así como para identificar la presencia de sustancias de interés como, por ejemplo, los contaminantes. El desarrollo de sensores nanotecnológicos busca mejorar significativamente la detección oportuna y, con esto, facilitar acciones rápidas para la remediación del medio ambiente (Zhang *et al.*, 2021).

Existen diversos nanomateriales que se han utilizado en los campos de la remediación ambiental como aquellos basados en nanotubos de carbono, materiales magnéticos o metales y sus óxidos como, por ejemplo, el hierro cero valente (Figura 7). Una aplicación frecuente de este último nanomaterial es la remoción de metales pesados, tales como mercurio, plomo y cadmio, en agua para consumo humano (Altammar, 2023; Ghongade & Vitthal, 2022).

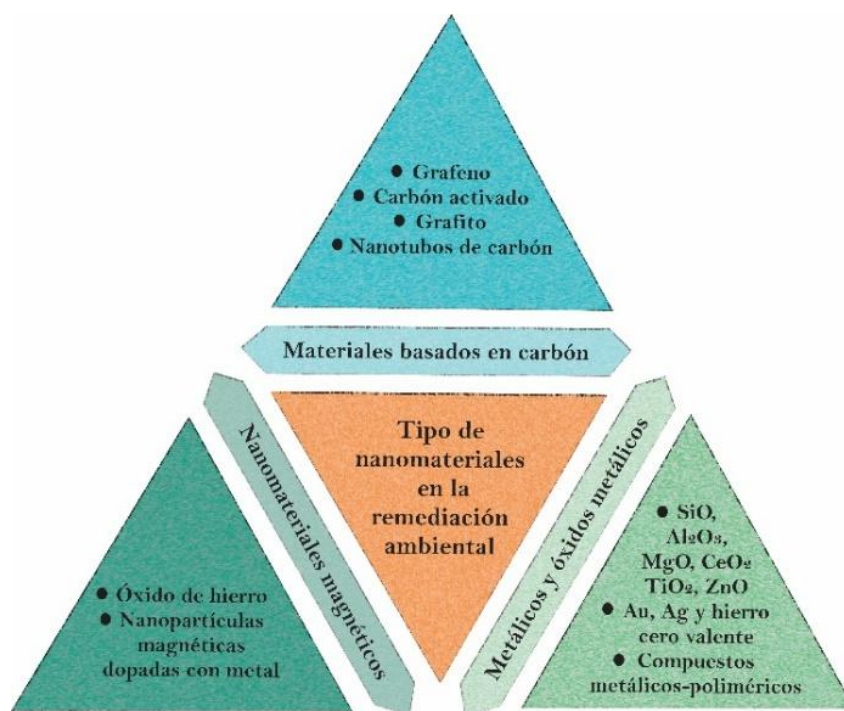


Figura 7: Tipos de nanomateriales en la remediación ambiental.

Otros nanomateriales sobresalientes son las NP de magnetita, debido a su alta capacidad de adsorción, gran estabilidad, fácil recuperación y bajo costo, lo que las convierte en una opción prometedora para la remoción de contaminantes en el tratamiento de aguas residuales (Tripathy *et al.*, 2024).

En el caso de remediación del suelo, los nanomateriales se han llegado a utilizar para remover contaminantes como metales pesados, herbicidas y compuestos orgánicos persistentes. Todas estas sustancias químicas se caracterizan por que no se degradan fácilmente, permaneciendo por largos periodos en el ambiente y llegando inclusive a acumularse en los tejidos de los seres vivos, causando enfermedades cardiovasculares, inmunológicas y endocrinas (Guerra *et al.*, 2018).

Los procesos más comúnmente utilizados para el manejo de contaminantes ambientales son la inmovilización y la adsorción, empleando, por ejemplo, nanomateriales basados en carbón, óxidos metálicos y compuestos de diversos materiales. Usando NP de óxido de hierro se puede inmovilizar y adsorber cadmio y arsénico del suelo. Otro ejemplo, son las NP que utilizan procesos de oxidación avanzada, los cuales emplean diversos oxidantes para la descomposición de contaminantes orgánicos en suelos contaminados (Altammar, 2023).

Compuestos gaseosos como los óxidos de nitrógeno y de azufre, el monóxido de

carbono y el ozono, compuestos orgánicos volátiles y material particulado, importantes contaminantes del aire, también pueden ser removidos con nanomateriales mediante fotocatalisis con dióxido de titanio (Ghongade & Vitthal, 2022).

Con ayuda de la nanotecnología es posible hacer una remoción efectiva de sustancias orgánicas, inorgánicas, patógenos y metales tóxicos en el agua, con beneficios tales como eficiencia operativa, bajos costos y disposición de reutilización (Tripathy *et al.*, 2024; Singh *et al.*, 2020).

De esta manera, el tratamiento y recuperación del agua es importante puesto que es un recurso esencial que hoy enfrenta grandes retos. ¿Cómo pueden ayudarnos estas nanopartículas en la descontaminación de aguas residuales? Lo exploraremos a continuación.

## **NANOPARTÍCULAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: INNOVACIÓN PARA UN RECURSO ESENCIAL**

El tratamiento que comúnmente se da a las aguas residuales (AR) puede ser físico, químico o biológico, aunque, por lo general se aplica una combinación de estos. Los métodos fundamentales de tratamiento consisten en 4 pasos: tratamiento preliminar, primario, secundario y terciario (Figura 8) (Epelle *et al.*, 2022).

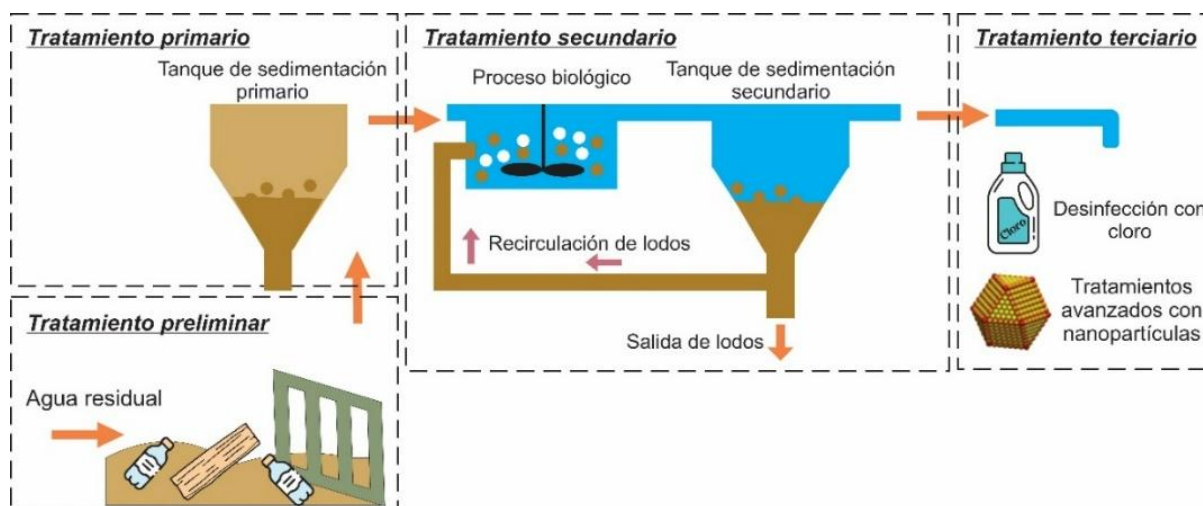


Figura 8: Etapas del tratamiento de las aguas residuales

**Tratamiento preliminar:** consiste en eliminar los materiales de mayor tamaño mediante rejas metálicas para retener materiales como plásticos, papel, madera, etc.

**Tratamiento primario** elimina una cantidad significativa de sólidos suspendidos y flotantes mediante sedimentadores, los cuales utilizan la acción de la gravedad para separar estos materiales del agua. Para mejorar la sedimentación, en ocasiones, se utilizan coagulantes que suelen ser costosos y tienen propiedades corrosivas.

**Tratamiento secundario:** se enfoca en la eliminación de contaminantes mediante procesos biológicos, es decir, que emplean microorganismos que utilizan los contaminantes como alimento, removiéndolos del agua. Este proceso genera nuevos microorganismos, también llamados biomasa, la cual se remueve en otro sedimentador, también por acción de la gravedad. Una desventaja de este tratamiento es que no eliminan de manera efectiva los contaminantes emergentes, como medicamentos y productos de limpieza doméstico.

**Tratamiento secundario:** por último,

se eliminan los nutrientes, patógenos, olores o contaminantes que no se removieron en los tratamientos anteriores. Así, se utilizan técnicas fisicoquímicas, como la desinfección, la adsorción con carbón activado o la ósmosis inversa. Además, tecnologías de oxidación avanzada, como la fotocatalisis y la fotoelectrocatalisis, son enfoques nanotecnológicos prometedores para la remediación del agua, ya que usan catalizadores semiconductores en forma de nanomateriales.

A pesar de que las plantas de tratamiento de AR están diseñadas para eliminar una gran variedad de contaminantes, como partículas suspendidas y coloidales, nutrientes, patógenos y materia orgánica, suelen ser ineficaces frente a los contaminantes emergentes (CE). Esto provoca que el agua tratada no siempre cumpla con los estándares internacionales, ya que los CE representan un riesgo para la salud humana y los ecosistemas, ¡a pesar de encontrarse en concentraciones tan pequeñas como  $\text{ng/L}$  o  $\mu\text{g/L}$  (Mahmood *et al.*, 2022).

Los CE están constituidos por lo que queda en el agua residual después del uso de productos de cuidado

personal, medicamentos, colorantes, microorganismos, pesticidas, hormonas y metales pesados. Algunos también pueden acumularse en los tejidos, afectando el desarrollo y crecimiento (Solcova *et al.*, 2024; Mahmood *et al.*, 2022). Además, se han asociado con la resistencia antimicrobiana, efectos neurotóxicos y la posible generación de tumores (Mahmood *et al.*, 2022).

Debido a sus concentraciones tan pequeñas, representan un enorme reto tratarlas con los sistemas convencionales de tratamiento, como

los que ya describimos.

Por esta razón, los nanomateriales se han convertido en una alternativa excelente para su remoción, y recientemente han comenzado a aplicarse para el tratamiento de diversos CE. Gracias a la gran área superficial y capacidad de adsorber diferentes contaminantes (Figura 9), los nanomateriales son ideales para enfrentar este desafío (Solcova *et al.*, 2024).

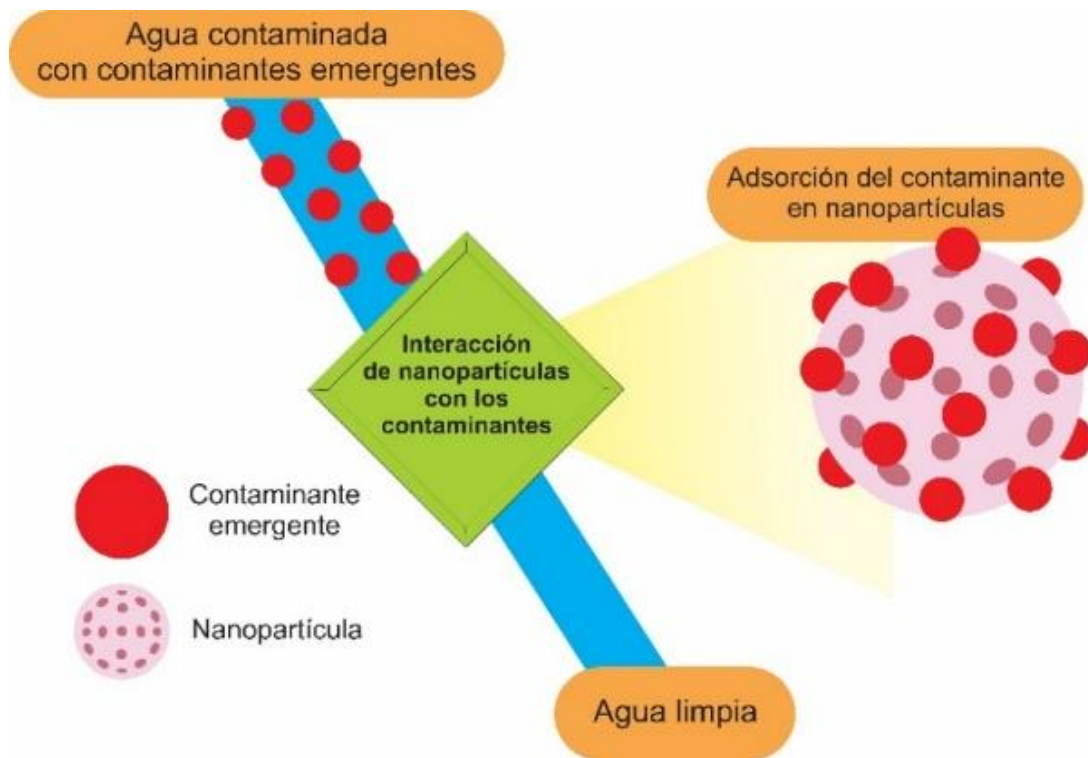


Figura 9: Interacción de nanopartículas usados en la etapa terciara para remover contaminantes emergentes.

El tratamiento de las AR con NP para remover CE incluye diferentes técnicas como procesos con membranas, fotocatalisis y adsorción, en las cuales se incorporan nanopartículas para mejorar su eficiencia en la remoción de diversos CE, como se muestra en la Tabla 1 (Tripathy *et al.*, 2024; Epelle

*et al.*, 2022; Guerra *et al.*, 2018). Cada una de estas técnicas está orientada a eliminar grupos específicos de CE. Además, la combinación de técnicas y de diferentes nanomateriales puede mejorar significativamente la eficiencia de la remoción (Mahmood *et al.*, 2022).

**Tabla 1.** Aplicaciones de diferentes materiales de NP para la remoción de CE.

Técnica	Material	Aplicación
Adsorción	Nanotubos de carbono	Remoción de medicamentos como diclofenaco y amoxicilina
	Óxidos metálicos	Remoción de colorantes, pesticidas y medicamentos
Procesos con membranas	Nanofibras con plata	Actividad antimicrobiana y remoción de colorantes
Fotocatálisis	ZnO	Remoción de pesticidas, medicamentos y colorantes
	TiO <sub>2</sub>	Remoción de pesticidas y medicamentos

Gracias a sus propiedades, tales como su pequeño tamaño y gran relación superficial, los nanomateriales son candidatos prometedores para eliminar contaminantes en los tratamientos de las AR, sin la dependencia de utilizar productos químicos nocivos ni de uso excesivo de energía. Cada una de las diferentes aplicaciones de los nanomateriales dependerá del tratamiento que se quiera realizar para la remediación del agua (Ugrina y Jurić, 2023).

Diversos estudios han demostrado la efectividad de las NP en la eliminación de contaminantes en aguas residuales e industriales. Por ejemplo, las NP de CuO han mostrado una capacidad antimicrobiana notable, logrando eliminar el 92% de *Eenterococcus faecalis* y también una degradación fotocatalítica del 76% del tinte negro reactivo 5. Por su parte, en el caso de antibióticos, como la oxitetraciclina, se ha reportado una remoción del 96% mediante el uso de  $MnFe_2SO_4$  soportado en bentonita bajo irradiación con luz visible (Epelle *et al.*, 2022).

En cuanto a metales pesados, las NP de óxido de hierro han sido eficaces para

la adsorción de cromo (VI), alcanzando una eficiencia del 98.1%. Para colorantes como el azul de metileno, se ha logrado una remoción del 90% utilizando hidrogeles con NP de magnetita. Además, las NP de plata integradas en membranas han demostrado ser altamente eficientes en la eliminación de bacterias como *Escherichia coli*, con porcentajes de remoción cercanos al 99%, lo que las convierte en una alternativa prometedora para el tratamiento de AR (Guerra 2018).

Sin embargo, los nanomateriales enfrentan diversos desafíos para su implementación en el tratamiento de AR, siendo el principal obstáculo los costos asociados cuando se utilizan elementos de tierras raras para su creación. Por tanto, algunos nanomateriales son costosos para producirlos, lo que limita su uso a nivel escala industrial, sobre todo en regiones con recursos limitados. Es por ello que en el campo de la nanotecnología un área importante a explorar son síntesis rentables, sustentables y escalables (Tripathy *et al.*, 2024; Ugrina y Jurić, 2023).

A pesar de que los nanomateriales con frecuencia tienen altas capacidades

de adsorción, su eficiencia se puede ver afectada por otros compuestos que pueden competir con los contaminantes que se desean remover. Por tanto, aquí hay otro desafío que se debe de enfrentar, buscar materiales que tengan una gran afinidad con el contaminante objetivo, sin que se vea gravemente afectada por otros compuestos presentes en el AR. Esto puede implicar el desarrollo de nanomateriales diseñados específicamente para la remoción de un contaminante en particular o la integración de nanocompuestos con propiedades de adsorción selectiva (Tripathy *et al.*, 2024).

## CONCLUSIONES

Con este artículo se ha evidenciado que la nanotecnología está logrando avances significativos en la remediación ambiental, pues el uso de nanomateriales permite recuperar eficazmente las aguas contaminadas eliminando sustancias como compuestos orgánicos, metales pesados, sales y partículas diminutas. Esto los posiciona como una opción prometedora para el tratamiento de las aguas residuales sin el uso de productos químicos dañinos ni consumo excesivo de energía, allanando el camino hacia un futuro más limpio. Además, la aplicación de las nanopartículas todavía es un campo con muchas áreas de oportunidad y de exploración para su aplicación en diversos campos, tales como la agricultura, la electrónica y la medicina, entre otras.

## Referencias

[1] Altammar, K. A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Frontiers in Microbiology*, 14, 2023.

[2] Epelle, E., Okoye, P., Roddy, S., Gunes, B., Okolie, J. Advances in the Applications of Nanomaterials for Wastewater Treatment. *Environments*, 9, 2022.

[3] Guerra, F.D., Attia, M.F., Whitehead, D.C., Alexis, F. (2018). Nanotechnology for Environmental Remediation: Materials and Applications. *Molecules*, 23, 2018

[4] Ghongade, H.P., Vitthal, D.S. A review on nanoparticles – Classifications, synthesis and applications. *Int. J. Creat. Res. Thoughts*, 10[2], 2022.

[5] Mahmood, T., Momin, S., Ali, R., Naeem, A., Khan, A. Technologies for removal of emerging contaminants from wastewater. *IntechOpen*, pp.1-20, 2022.

[6] Singh, V., Chauhan, V., Singh, S., Shukla, S., Vishnolia, K.K., *Applications of Nanoparticles in Various Fields, Diagnostic Applications of Health Intelligence and Surveillance Systems*, IGI Global, 2020, pp.221–236. DOI: 10.4018/978-1-7998-6527-8.ch011.

[7] Solcova, O., Dlaskova, M., Kastanek, F. Challenges and advances in tertiary wastewater treatment for municipal treatment plants. *Processes*, 12[10], 2024.

[8] Tripathy, J., Mishra, A., Pandey, M., Thakur, R.R., Chand, S., Rout, P.R., Shahid, M.K. Advances in Nanoparticles and Nanocomposites for Water and Wastewater Treatment: A Review. *Water*, 16, 2024.

[9] Ugrina, M., Jurić, A. Current Trends and Future Perspectives in the Remediation of Polluted

- Water, Soil, and Air: A Short Review. *Processes*, 11, 3270, 2023.
- [10] Zhang, Y., Zhu, Y., Zeng, Z., Zeng, G., Xiao, R., Wang, Y., Hu, Y., Tang, L., Feng, C. Sensors for the environmental pollutant detection: Are we already there? *Coordination Chemistry Reviews*, 431, 2021.



## Abstract

Learning about the experiences of graduates from a professional program adds value to students' education while they pursue their degree; it can also guide them in making early decisions related to their professional future. One of these decisions may be to pursue a postgraduate degree. This article presents recommendations and experiences described by several Software Engineering graduates who pursued postgraduate studies. The graduates described aspects such as their reasons for continuing their studies, some of which were related to their professional or academic development, and others more closely related to personal issues. These experiences, expressed from diverse perspectives, are captured in this document, reflecting the experiences derived from postgraduate studies in academia and industry.

**Keywords:** Postgraduate, Software Engineering, graduates, professional development

## Resumen

Conocer las experiencias de los egresados de una carrera profesional es un elemento que agrega valor a la formación de los estudiantes mientras cursan su carrera y puede orientarlos para tomar decisiones de forma temprana relacionadas con su futuro profesional. Una de estas decisiones puede ser la de estudiar un posgrado. Este artículo presenta recomendaciones y experiencias descritas por varios egresados de una carrera de Ingeniería de Software que llevaron a cabo estudios de posgrado. Los egresados describieron aspectos tales como las razones que tuvieron para seguir estudiando, algunas de ellas relacionadas con su desarrollo

profesional o académico, y otras más vinculadas con cuestiones personales. Estas experiencias, expresadas desde puntos de vista diversos, el documento recoge estas vivencias derivadas de los estudios de posgrado desde la academia y la industria.

**Palabras clave:** Posgrado, Ingeniería de Software, egresados, desarrollo profesional

## Introducción

La educación es el pilar fundamental sobre el que se construye el progreso de cualquier sociedad. A través del aprendizaje continuo y la adquisición de conocimientos y habilidades, los individuos desarrollan su potencial, se adaptan a los desafíos cambiantes del mundo y contribuyen de manera significativa al bienestar colectivo (Díaz Domínguez & Alemán, 2008). Desde la formación básica hasta la superior, la educación moldea ciudadanos informados, críticos y capaces de innovar, impulsando así el desarrollo económico, social y cultural de las naciones (Bano, 2015). Invertir en educación es, por lo tanto, invertir en el futuro, asegurando una sociedad más justa, equitativa y próspera para las generaciones venideras.

Dentro del amplio panorama educativo, la elección de una carrera universitaria representa un momento crucial en la vida de un individuo. Esta decisión, fundamentada en intereses personales, habilidades y la visión del futuro profesional deseado, marca el inicio de una especialización en un área específica del conocimiento. La formación universitaria no solo ofrece las herramientas teóricas y prácticas necesarias para el desempeño laboral, sino que también promueve el pensamiento analítico, la resolución de

problemas complejos y la capacidad de aprendizaje autónomo, competencias esenciales en un entorno laboral cada vez más dinámico y competitivo (García Ancira & Treviño Cubero, 2020).

En este contexto, la Licenciatura en Ingeniería de Software surge como una disciplina de vital importancia en la era digital. Dedicada al análisis, diseño, implementación, pruebas y mantenimiento de sistemas de software, esta carrera se sitúa en el corazón de la transformación tecnológica actual (Pressman, 2010). Los ingenieros de software son los arquitectos del mundo digital, creando aplicaciones, plataformas y sistemas que impulsan la comunicación, el comercio, la industria y prácticamente todos los aspectos de la vida moderna. Su labor exige una sólida base en ciencias de la computación, habilidades de programación, capacidad para trabajar en equipo y una constante actualización ante la rápida evolución de las tecnologías (Sommerville, 2015).

Sin embargo, el camino del aprendizaje no termina con la obtención del título de licenciatura. Los estudios de posgrado, como maestrías y doctorados, representan una oportunidad invaluable para profundizar en áreas específicas de la ingeniería de software, desarrollar habilidades de investigación y especialización, y mantenerse al tanto de las últimas tendencias y avances tecnológicos (Sánchez Saldaña, 2004). La formación de posgrado no solo amplía las perspectivas profesionales, abriendo puertas a roles de liderazgo, investigación y desarrollo, sino que también contribuye a la generación de nuevo conocimiento y a la innovación en el campo, impulsando así el avance continuo de la ingeniería de software y su impacto en la sociedad.

Según el anuario estadístico 2023-2024 de la ANUIES (Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior) en México, 2408 personas habían culminado sus estudios de posgrado (con la obtención de un título de maestría o de doctorado) en el campo de las tecnologías de la información y comunicación (TIC). En este contexto, 63.0% de los graduados fueron hombres y 29.3% mujeres se titularon en una maestría, y 5.6% hombres y 2.0% mujeres adquirieron un grado de doctor (ANUIES, 2025).

A pesar de los beneficios que conlleva estudiar un posgrado muchos egresados se encuentran en el dilema sobre si deben estudiar un posgrado o trabajar, por lo que este artículo presenta los aspectos más destacados que mencionaron ingenieros de software que estudiaron un posgrado.

Durante el período 2023-2024, las instituciones de educación superior (IES) del estado de Sinaloa aportaron únicamente el 1.5% del total de personas tituladas en posgrados del área de las TIC a nivel nacional. En contra parte, las IES de la Ciudad de México aportaron el 43.4% (ANUIES, 2025)

A través de este documento se espera que los egresados puedan informarse sobre las ventajas de los posgrados y tomar su propia decisión de acuerdo con sus objetivos y prioridades. Además, se brindan algunos aspectos importantes si te interesa estudiar un posgrado y estas estudiando aun el pregrado.

### **Desarrollo**

Algunos estudiantes egresados de ingeniería de software fueron invitados a impartir conferencias donde explicaran sus motivaciones y beneficios obtenidos al estudiar un posgrado.

Los conferencistas son del área de ingeniería de Software, la mitad de estos terminaron sus estudios y estudiaron maestría, actualmente trabajan en la industria; la otra mitad estudiaron maestría y doctorado, ahora trabajan en la academia. Cada conferencista realizó su presentación de 40 a 50 minutos, posteriormente se pasó a la etapa de preguntas. Cabe mencionar que el público eran estudiantes de una carrera de Ingeniería de Software, por lo que los conferencistas eran egresados de la misma universidad, de esta forma el estudiante podría identificarse con ellos.

A continuación, se describen los aspectos más destacados en las conferencias.

1. Estudiar maestría dadas las pocas oportunidades de empleo: Actualmente, las oportunidades de buenos empleos están muy escasas, más aún en ciudades pequeñas, por lo que continuar estudios en posgrados donde den becas es atractivo. Estos posgrados deben de estar en el Sistema Nacional de Posgrado (SNP) para recibir un apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI, 2025), de esta forma brindar una forma de manutención al estudiante. Muchas veces esta beca es mayor que el salario que perciben los estudiantes recién egresados por lo que se ven en la necesidad de estudiar un posgrado con el beneficio de incrementar sus ingresos. Además, recibir una beca es mejor que estar desempleado. Estos son motivaciones que tienen muchos egresados al terminar sus estudios y encontrarse con un mundo laboral con pocas oportunidades.

2. Comodidades de un estudiante, pero con un ingreso económico: Aunque la beca otorgada es regular frente a un salario, si te organizas con otros

estudiantes pueden dividir gastos de vivienda, transporte, comida u otro servicio haciendo el estudio de posgrado más ameno. De esta forma, puedes tener las comodidades de un estudiante como vacaciones, días festivos, fines de semana libres, pero con la ventaja que recibes un ingreso y además te preparas académicamente para un futuro empleo. Esto te permite más tranquilidad para desarrollar tu investigación y generar un aprendizaje de mayor calidad.

3. Resolver problemas sociales: Dependiendo de las líneas de investigación que se elijan en el posgrado, es posible participar en proyectos para apoyar a la comunidad o grupos vulnerables tales como desarrollo de investigación para personas con alguna discapacidad, resolver problemas de la educación, preservar lenguas indígenas entre otros. Estas investigaciones necesitan ser aplicadas con beneficio para la sociedad.

4. Conocer otros países y culturas: Existen muchos posgrados donde los investigadores participan en convocatorias y obtienen recursos para investigaciones, hay distintos rubros como compra de equipo de cómputo, de software, de libros, viáticos para presentar investigación a congresos, entre otros. Este último aspecto permite a estudiantes de posgrado asistir a otros países a presentar sus avances de investigación, conociendo a su vez otras culturas, además de establecer colaboraciones con otros investigadores. Esto permite tener otra visión de nuestra investigación al compararnos con otros proyectos y conocer cómo se desarrolla la sociedad en otras regiones.

5. Mejorar la capacidad de análisis: Los estudios de posgrado pueden servir para desarrollar las capacidades

de análisis y pensamiento crítico. Existen materias como la metodología de la investigación donde en sus fases iniciales es necesario revisar literatura y tener una visión crítica para determinar cuál será tu problema para tratar. Esto se logra analizando y comparando los aportes científicos y llegando a una conclusión sobre las necesidades del campo. Esta habilidad puede ser fácilmente empleada en el desarrollo de software que requiere un análisis similar, por lo que es común hacer comparativas con desarrollos similares para encontrar nuestra área de oportunidad y hacer un desarrollo exitoso.

6. Especialización en un área: La maestría permite especializarse en áreas de interés en la carrera, por ejemplo, si te interesa profundizar en seguridad informática sería apropiado elegir un posgrado que tenga líneas de investigación sobre esta área, así el estudio está enfocado en un tema de interés, posteriormente si se desea ingresar a trabajar a la industria en una vacante relacionada sobre seguridad, se tendría una ventaja sobre aquellos que no tiene dicha especialización, esto permite aprovechar oportunidades laborales aun cuando son escasas.

7. Habilidades avanzadas de desarrollo de software: Los estudios de posgrado se caracterizan por resolver problemas de ciencia básica o aplicada, el hecho es que no han sido resueltos por técnicas comunes, por lo que la investigación siempre busca nuevos métodos para poder solucionar problemas. Esto implica que las técnicas que se pueden aprender en el desarrollo de software en la investigación son mejoras a las técnicas actuales, incluso pueden ser técnicas nuevas, primero surgen en laboratorios para después

pasar su uso en aplicaciones de la sociedad. Esto permite el desarrollo de software empleando investigación de frontera con productos altamente novedosos. Podemos citar el caso de la inteligencia artificial generativa con ejemplos como CHATGPT, GEMINI, DEEP SEEK entre otras, aplicaciones que hasta hace algunos años parecían imposibles, ahora son una realidad debido a nuevas técnicas de aprendizaje máquina.

8. Habilidades de investigación científicas: Uno de los aspectos más obvios y destacados es que al estudiar un posgrado saldrás con habilidades y competencias para la investigación tales como identificar problemas, diseño de metodologías y experimentos, resolución de problemas, pensamiento crítico, redacción, entre otras más. Todas estas habilidades no solo te sirven en el ámbito académico, sino que son fácilmente aplicables en la industria y en la vida diaria.

Recomendaciones si te interesa estudiar un posgrado cuando estas aún en la licenciatura:

1. Titularte con tesis: Titularte por medio de tesis te servirá como entrenamiento antes de entrar a un posgrado. De esta forma, puedes desarrollar habilidades de investigación desde el pregrado, facilitando la adaptación y desarrollo de tu proyecto cuando estes en posgrado. Además, puedes definir temas o líneas de investigación de tu agrado y evitar experimentar en posgrado tiempos de entrega limitados y mayor presión para obtener resultados.

2. Aprovechar veranos de investigación: Existen diferentes programas de investigación para estudiantes, estos te permiten trabajar

con un investigador consolidado en los veranos conociendo y aplicando técnicas de investigación y así adquirir conocimiento para tu futuro posgrado. Además, creas relaciones con otros estudiantes, profesores o investigadores que pueden recomendarte o guiarte hacia un posgrado. En México, existe el programa DELFIN (DELFIN, 2025) para relacionar a estudiantes en investigaciones desde pregrado, un número grande de universidades están asociadas al programa por lo que es fácil obtener movilidad a diferentes regiones del país que sean de tu interés.

3. Participar en proyectos de investigación: Es posible que el estudiante participe en proyectos de investigación con profesores de la misma universidad a través del servicio social o incluso con una beca, de esta forma se introduce a la investigación aplicando los conocimientos de su carrera, así cuando llegue el momento de elaborar una tesis será más fácil desarrollarla. Muchas veces el proyecto que apoyan los estudiantes es la misma tesis que presentaran como medio de titulación. Además, que tu asesor podría brindarte cartas de recomendación para tus futuros proyectos.

4. Dominar inglés: Tener un dominio del inglés en posgrado es muy importante debido a varias razones. La mayoría de las publicaciones de alto impacto están en inglés, por lo que será necesario analizarlas en algún momento, sin mencionar que tú mismo tendrás que redactar en ese mismo idioma. La colaboración con otros países requiere hablar y escribir en inglés, este es el idioma oficial del mundo por lo que es necesario prepararse para cuando sea necesario. Estudiar algunos cursos antes de iniciar un posgrado será de mucha ayuda para desarrollar tu investigación

de forma menos compleja.

5. Asistir a congresos: La asistencia a congresos es importante ya que estos reúnen a expertos que exponen los últimos avances del área, así puedes identificar tendencias emergentes o temas relevantes para tu investigación. Además, puedes conocer profesores e investigadores que pueden darte consejos sobre posgrados, universidades o convocatorias para becas. Aunado a esto, puedes ver las exposiciones y analizar las formas de presentar los temas de investigación, posturas, diapositivas, vestimentas, etc. Realmente son muchas las ventajas de asistir a congresos si se quiere extender en el tema puede consultar (Angulo Marcial, 2009).

### **Conclusiones**

Las estadísticas que presenta ANUIES para el estado de Sinaloa son bajas, en parte porque son pocas las IES (incluida la UAS) que ofrecen becas para estudios de posgrado, no obstante, sabemos que este no debe ser el único motivante. En este sentido, el presente trabajo recoge y describe las experiencias de algunos egresados de la carrera de Licenciatura en Ingeniería de Software con estudios de posgrado.

Las experiencias vertidas ponen de manifiesto que entre las razones por las que los estudiantes cursan un posgrado se encuentran por qué quieren especializarse en un área de conocimiento de su interés, obtener habilidades avanzadas en desarrollo de software o habilidades de investigación científicas.

Otros elementos que vale la pena destacar es la mención a cuestiones no relacionadas directamente con el desarrollo profesional o la investigación,

tales como el hecho de estudiar un posgrado porque consideran que hay pocas oportunidades de empleo en la industria, para tener lo que llaman «comodidades de un estudiante» pero con un ingreso económico o por la posibilidad de conocer otros países o culturas.

También se expresan una serie de recomendaciones tales como hacer tesis para titularse o participar en proyectos de investigación los cuales son experiencias importantes de los egresados que pueden ser útiles para los estudiantes actuales, ya que les posibilitará identificar puntos importantes o reconocer sus áreas de mejora para trazar un camino que les permita en un futuro aumentar sus posibilidades de éxito para ingresar a un posgrado.

## Referencias

- [1] Angulo Marcial, N. (2009, October 14). *La importancia de los congresos y reuniones académicas como fuente de información para la innovación y la generación del conocimiento. Congreso Internacional de Innovación Educativa.* <https://www.repo-ciee.dfie.ipn.mx/pdf/707.pdf>
- [2] ANUIES (2025). Anuarios Estadísticos de Educación Superior de la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior. Recuperado el 24 de abril de 2025: <https://www.anuies.mx/informacion-y-servicios/informacion-estadistica-de-educacion-superior/anuario-estadistico-de-educacion-superior>
- [3] Bano, A. (2015). Importance of education. *IJBRTISH*, 2(2), 48–50.
- [4] DELFIN. (2025, April 4). *Programa DELFIN. Programa Interinstitucional Para El Fortalecimiento de La Investigación y El Posgrado Del Pacífico.* <https://programadelfin.org.mx/>
- [5] Díaz Domínguez, T., & Alemán, P. A. (2008). La educación como factor de desarrollo. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, 23, 1–15.
- [6] García Ancira, C., & Treviño Cubero, A. (2020). Las competencias universitarias y el perfil de egreso. *Estudios Del Desarrollo Social*, 8(1).
- [7] Pressman, R. (2010). *Software Engineering: A Practitioner's Approach* (7th ed.). McGraw-Hill, Inc.
- [8] Sánchez Saldaña, M. (2004). Calidad e innovación en el posgrado: el papel de las tecnologías de la información. *Revista Digital Universitaria*, 5(10), 1067–6079.
- [9] SECIHTI. (2025, April 4). *Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación. Sistema Nacional de Posgrados.* <https://secihti.mx/consultas-snp/>
- [10] Sommerville, I. (2015). *Software Engineering*. Pearson.

# Reciclando cosas raras

**Dra. Astrid Delfina Toache Perez**

Instituto Politécnico Nacional - UPIT

## Abstract

Current technologies depend on little-known but essential elements: rare earths. Although they are not scarce on Earth, their extraction is complex and polluting. These elements are used in screens, electric vehicles, medicine, and more. However, their demand is growing and resources are being depleted, which is why their recovery from electronic waste is being sought through different methods such as acid leaching, pyrometallurgy, or more environmentally friendly techniques. Recycling rare earths not only reduces environmental impact, it also boosts access to clean technologies and paves the way for a circular and sustainable economy.

**Keywords:** Rare earths, electronic waste, recovery, circular economy.

## Resumen

Las tecnologías actuales dependen de elementos poco conocidos pero esenciales: las tierras raras. Aunque no son escasas en la Tierra, su extracción es compleja y contaminante. Estos elementos se usan en pantallas, autos eléctricos, medicina y más. Sin embargo, su demanda crece y los recursos se agotan, por esta razón se busca su recuperación a partir de la basura electrónica mediante diferentes métodos como lixiviación ácida, la pirometalurgia o técnicas más ecológicas. Reciclar tierras raras no solo reduce el impacto ambiental, también impulsa el acceso a tecnologías limpias y marca el camino hacia una economía circular y sustentable.

**Palabras clave:** Tierras raras, basura electrónica, recuperación, economía circular.

## Introducción

Gracias a las nuevas tecnologías podemos tener una vida más organizada, una casa más limpia, comunicarnos con personas en cualquier parte del planeta en tiempo real, utilizar energías limpias en casa, dispositivos para tener experiencias de realidad virtual y mucho más, pero ¿has considerado que elementos de la tabla periódica son esenciales para su funcionamiento?, y aún más, ¿sabes el daño que esta tecnología genera al planeta?, ¿existirá alguna forma de evitar los daños colaterales? A continuación, trataremos de contestar estas preguntas.

En la actualidad, las tecnologías más modernas necesitan elementos de la tabla periódica muy especiales para poder tener todas las características que las hacen novedosas, algunos de estos elementos son galio, indio, germanio y elementos de tierras raras (TR) (escandio, itrio y los 15 elementos del grupo de lantánidos) (Ohene Opare, Struhs & Amin Mirkouei, 2021) principalmente. Sin embargo, en el escenario global, los depósitos minerales de estos elementos son cada vez más escasos, excluyendo a China quien actualmente es considerado un monopolio en la extracción y producción de más del 90% de TR a nivel mundial, generando que este país pueda tener control del uso, el costo y la distribución de estos elementos (Shen, Y., Moomy, R. & Eggert, R.G., 2020), en consecuencia, es que se buscan alternativas para recuperar estos elementos presentes en diversos aparatos y equipos electrónico que estén en desuso y utilizarlos en nuevas tecnologías.

## ¿Por qué son raros?

Para empezar los elementos de TR no llevan su nombre por ser “escasos” en la corteza terrestre, de hecho, se

encuentran en abundancia de manera similar al níquel, cobre, zinc o estaño, sin embargo, a diferencia de los elementos mencionados las TR están distribuidas alrededor del mundo, pero en muy bajas concentraciones y en conjunto a otros minerales y/o elementos que incluso pueden llegar a ser tóxicos o radioactivos, lo que hace que se requiera una gran cantidad de pasos (trituration, cribado, uso de agentes químicos, tratamientos térmicos, etc.) para su obtención. El proceso de extracción de TR se puede resumir en 4 etapas (pre-concentración, purificación, separación y refinado), sin embargo, estos elementos cuentan con características físico-químicas muy similares lo que hace muy complicado el último proceso de refinado y es por esta complejidad que adquieren el nombre de “raras”. De igual manera obtener las TR de la corteza terrestre genera impactos irreversibles al medio ambiente y a la salud de los seres vivos, tales como la erosión y pérdida

de suelos fértiles, contaminación tanto aguas superficiales como subterráneas, destrucción de hábitats, entre muchos otros daños (Ohene Opore, Struhs & Amin Mirkouei, 2021).

### **Pero... ¿cuál es la importancia de estos elementos “raros”?**

Desde 1890 los elementos de TR han tenido aplicaciones cruciales en diferentes sectores de la industria, son ampliamente utilizados en equipos militares, en medicina, agricultura, electrónica, energía verde y en nuevos materiales que a pasos agigantados van incursionando en la industria, tal es así que se han referido a estos elementos como las “vitaminas de la industria” (Tao *et al.*, 2022), al mismo tiempo estos elementos adquieren gran importancia en la generación de nuevas y mejores tecnologías que permiten la transición hacia una economía verde (Pangsy-Kania & Flouros, 2022).

Tabla 1: *Ejemplos de la aplicación de elementos de Tierras Raras (TR) en diferentes áreas.*

Área de Aplicación	Ejemplos
Equipos militares	Sistemas de radar y sensores, Propulsión, Visión nocturna y camuflaje, Submarinos (propulsión silenciosa), Tecnología satelital y espacial.
Medicina	Tecnología láser para procedimientos quirúrgicos, Diagnóstico por imágenes (RM y Rayos X), Tratamientos contra el cáncer, Prótesis y liberación controlada de fármacos.
Agricultura	Conservación de semillas, Reducción de toxicidad de metales, Fertilizantes y pesticidas sostenibles.
Electrónica	Sensores y sistemas espaciales, Discos duros y dispositivos de memoria avanzada, Baterías recargables y celdas de combustible, Telecomunicaciones.
Energía verde	LEDs de bajo consumo de energía, Almacenamiento de energía renovable, Generación de energía solar, Vehículos eléctricos.
<i>Nota:</i> (OpenAI, 2025).	

## ¿Cómo se pueden recuperar las TR de la basura electrónica y eléctrica?

Hoy en día hay una amplia investigación para el reciclaje de TR a partir de basura electrónica, un ejemplo es la técnica de lixiviación ácida, utilizando la combinación de ácidos muy fuertes como ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), ácido nítrico ( $HNO_3$ ) y ácido clorhídrico (HCL) (Yuksekdag *et al.*, 2022); otro método muy utilizado en las empresas de reciclaje es la pirometalurgia, la cual incluye el uso de hornos especiales con elevadas temperaturas además, en estos procesos es posible obtener residuos de aceite y gas que pueden ser utilizados como alternativas a los combustibles fósiles (Andooz *et al.*, 2022). Por último, con la intención de utilizar métodos y procesos que sean menos agresivos con el medio ambiente se han estudiado y aplicado la bio-lixiviación, que emplean microorganismos o biomateriales para la recuperación de TR sin embargo,

estos procesos siguen siendo lentos y poco eficientes en comparación con los métodos mencionados anteriormente (Ohene Opare, Struhs & Amin Mirkouei, 2021).

Más actualmente se estudian procesos sustentables, menos abrasivos y que requieren menor cantidad de energía y tiempo para la recuperación de TR, por ejemplo procesos que utilizan la sonoquímica, donde se utiliza frecuencias muy altas de sonido que, sumergidas en soluciones, crean microburbujas que son capaces de romper los enlaces que mantienen las TR unidas a otros elementos (Lütke *et al.*, 2023), así mismo, los procesos electroquímicos, donde se hace pasar energía a través de una solución acuosa llamada electrolito para de igual manera romper enlaces y recuperar las TR que se encuentren en solución (Balaram, 2024).

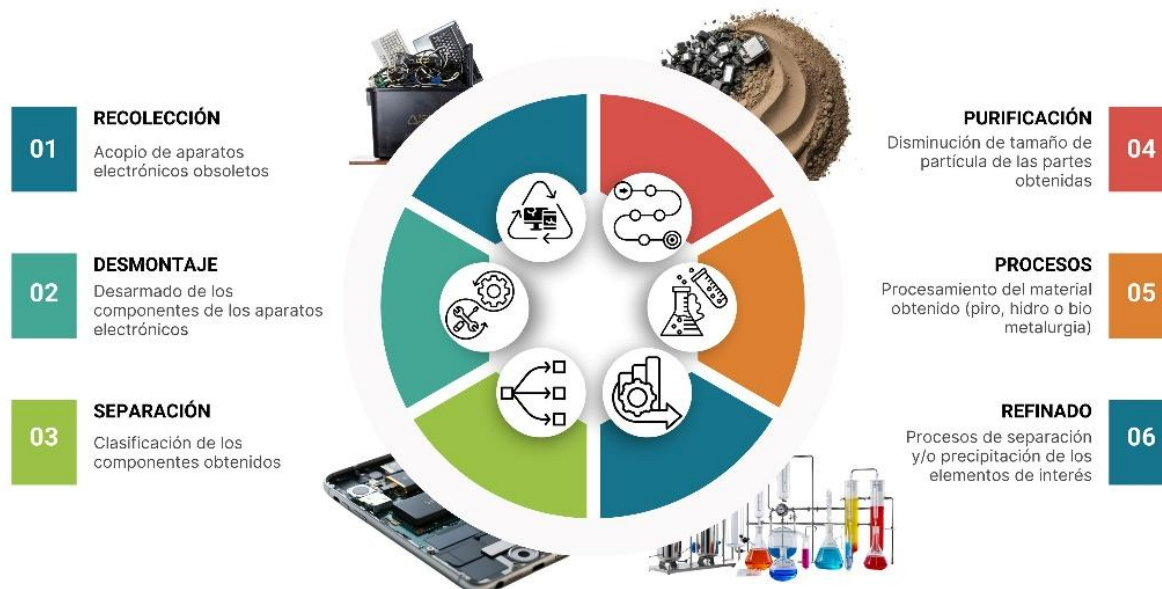


Figura 1: Principales pasos en el proceso de recuperación de TR a partir de basura electrónica.

## ¿En que podrían reutilizarse estos elementos? Y ¿Qué características deben tener para su reutilización?

Los elementos de TR recuperados a partir de electrónicos obsoletos,

pueden utilizarse en la generación de nuevas tecnologías (dispositivos móviles, baterías recargables, en equipos médicos, en la generación de energías limpias, imanes de alta potencia, entre

otros). Además, su recuperación desde fuentes secundarias permite los costos de producción, lo que facilita el acceso a tecnologías avanzadas para un mayor número de personas (Paleologos *et al.*, 2025).

No obstante, para que la reutilización sea viable, es fundamental que los elementos de TR que han sido recuperados cumplan con ciertas características esenciales, como una alta pureza, es decir, que estén libres de contaminantes o residuos no deseados y que el proceso de recuperación sea eficiente, causando un menor daño ambiental en comparación con los métodos tradicionales de minería (Paleologos *et al.*, 2025).

En conclusión, la alta demanda de TR y su dificultad de obtención, resalta su papel esencial en la innovación tecnológica y sugiere que la demanda de estos elementos seguirá en aumento por ello, resulta indispensable adoptar un enfoque basado en la economía circular y verde, las cuales promueven la recuperación y reutilización de elementos críticos para la generación nuevas tecnologías (Balaram, 2024).

## Referencias

- [1] Andooz, A., Eqbalpour, M., Kowsari, E., Ramakrishna, S., & Cheshmeh, Z. A comprehensive review on pyrolysis of E-waste and its sustainability, *J. Clean. Prod.*, 333, 130191, 2022.
- [2] Balaram, V., *Sustainable Recovery of Rare Earth Elements by Recycling of E-Waste for a Circular Economy: Perspectives and Recent Advances*, Environmental Materials and Waste (Second Edition), 2024, pp. 499-544.
- [3] Lütke, S., Pinto, D., Callegaro Brudi, L., Silva, L., Cadaval Jr., T., Duarte, F., . . . Dotto, G., Ultrasound-assisted leaching of rare earth elements from phosphogypsum, *Chem. Eng. Process.*, 191, 109458, 2023.
- [4] Ohene Opare, E., Struhs, E., & Amin Mirkouei, A., A comparative state-of-technology review and future directions for rare earth element separation. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 143, 110917, 2021.
- [5] OpenAI. (2025, Enero 16). Retrieved Enero 16, 2025, from ChatGPT: <https://openai.com/index/chatgpt/>
- [6] Paleologos, E., Mohamed, A.-M., Singh, D., O'Kelly, B., Gamal, M., Mohammad, A., . . . Leong, E.-C., Sustainability challenges of clean-energy critical minerals: copper and rare earths, *Env. Geotech.*, 12[2], pp. 88-100, 2025.
- [7] Pangsy-Kania, S., & Flouros, F. (23-24 November 2022). Rare Earth Elements as A Huge Economic Challenge For The Future of Green Economy. Proceedings of the 40th International Business Information Management Association, (pp. 530-538). Seville, Spain.
- [8] Shen, Y., Moomy, R., & Eggert, R.G., China's public policies toward rare earths, 1975–2018. *Miner. Econ.*, 33, pp. 127-151, 2020.
- [9] Tao, Y., Shen, L., Feng, C., Yang, R., Qu, J., Ju, H., & Zhang, Y., Distribution of rare earth elements (REEs) and their roles in plant growth: A review, *Environ. Pollut.*, 298, 118540, 2022
- [10] Yuksekdog, A., Kose-Mutlu, B., Zeytuncu-Gokoglu, B., Kumral, M.,

Wiesner, M., & Koyuncu, I., Process optimization for acidic leaching of rare earth elements (REE) from waste electrical and electronic

equipment (WEEE), *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 29, pp. 7772-7781, 2022.



