

# Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

Enero - Marzo 2025

ISSN:2683-2607

No. 141

¿Bichos en mi vaso?  
Bebidas fermentadas mexicanas  
con probióticos

Superfibras tejiendo el futuro

Microorganismos:  
Biofábricas productoras de energía

Nanoacarreadores:  
Novedoso enfoque en la lucha  
contra la enfermedad de chagas



# Contenido

## Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

No. 141 Enero - Marzo 2025

Editorial	3	Dr. Luis Alberto García Reyes C.P. Ruben Francisco Turriza Gonzalez
<i>¿Bichos en mi vaso? Bebidas fermentadas mexicanas con probióticos</i>	5	<i>Las nano-computadoras que vienen y el misterioso componente que podría hacerlas realidad</i> 66 Dr. Gerardo Abel Laguna Sánchez
Mtra. Daniela Arlette Ruiz Carrillo Dra. Rocío Albino Garduño Dr. Moisés Tejocote Pérez		<i>De residuos a riqueza: Cómo Hermetia illucens está revolucionando la gestión de desechos y la producción de proteína de alta calidad.</i> 76 Lic. Sofía Guadalupe Lerma Carreón Lic. María Fernanda Zúñiga Ayala Dr. Erick Josué Navarro Barrón
<i>Superfibras tejiendo el futuro</i>	15	
Dr. Daniel Alcalá Sánchez Dr. Juan Carlos Tapia Picazo		
<i>Microorganismos: Biofábricas productoras de energía</i>	28	<i>Humedales: Un ecosistema funcional en el planeta</i> 84 M.C. López Estrada Oliver Rodolfo Dr. García Mondragón David M.C. Suarez García Monserrat Dr. Gallego Alarcón Iván
Dr. Enrique Salgado Hernández Dr. Sergio Martínez Hernández Dr. Angel Isauro Ortiz Ceballos		
<i>Nanoacarreadores: Novedoso enfoque en la lucha contra la enfermedad de chagas</i>	37	<i>Hidrólisis ácida. Método convencional para la revalorización de biomasa lignocelulósica</i> 90 Alejandro Sánchez Mesa Dr. Julio César Gómora Hernandez Dra. Leidy Astrid Hoyos
Dra. Berenice Prestegui Martel Dra. Bertha Espinoza Gutiérrez		
<i>Relaciones tóxicas: obesidad e inflamación</i>	45	<i>Con azúcar y miel, hasta los fármacos saben bien</i> 101 Dr. David O. Tovar Anaya Dr. Eduardo Villarreal Ramírez Dr. Rafael A. Zubillaga Luna
M.C. Citlali Figueroa Guzmán Dra. Lorena Martínez Alcantar Dr. Jesús Campos García		
<i>Utilización de desechos municipales y lixiviados para generación de electricidad a partir de celdas microbianas</i>	55	
Dra. Gladis Guadalupe Suarez Velázquez Dr. Francisco Manuel García Reyes		

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

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

*Rector General*

Dr. José Antonio de los Reyes Heredia

*Secretaria General*

Dra. Norma Rondero López

## UNIDAD IZTAPALAPA

*Rectora*

Dra. Verónica Medina Bañuelos

*Secretario*

Dr. Javier Rodríguez Lagunas

*Director de la División de Ciencias  
Básicas e Ingeniería*

Dr. Román Linares Romero

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

Dr. José Luis Gómez Olivares

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

Consejo Editorial:

Dra. Verónica Medina Bañuelos

Dr. Javier Rodríguez Lagunas

Dr. Román Linares Romero

Dr. José Luis Gómez Olivares

*UAM- Iztapalapa*

*Editora en Jefe:*

M. C. Alma Edith Martínez Licona

*Asistente Editorial:*

Lic. Paula López Andrés

*Comité Editorial por CBS:*

Dra. Edith Arenas Ríos, 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. 141, Enero-Marzo 2025, 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. Prolongación Canal de Miramontes 3855, Col. Ex-Hacienda San Juan de Dios, Alcaldía Tlalpan, C.P. 14387, 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 2025. Tamaño del archivo 57.1 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 2025.

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

Deseando a nuestros lectores, autores y árbitros un nuevo año 2025 lleno de aprendizaje y éxito, presentamos el primer número de este trimestre, enero-marzo. Esperando que sea del interés de nuestros lectores y que disfruten de la lectura de varios artículos, en este caso, la mayoría relacionados en el área de ciencias biológicas y de la salud.

Aprovecho para agradecer a nuestros queridos autores por su confianza en el proceso editorial de nuestra revista y que gracias a sus contribuciones la revista ha ido creciendo primero de 78 a 100 páginas y en este 2025, llegamos a 120 páginas, esto para poder publicar más artículos en cada número y dar una mejor atención reduciendo el tiempo de espera en la publicación de estos.

El equipo de la Revista Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería continuará trabajando con gusto para seguir aportando, junto con sus lectores, autores y árbitros, en el crecimiento de esta revista que en marzo cumple 41 años desde que se publicó el primer número.

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: Szabadváy, 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,

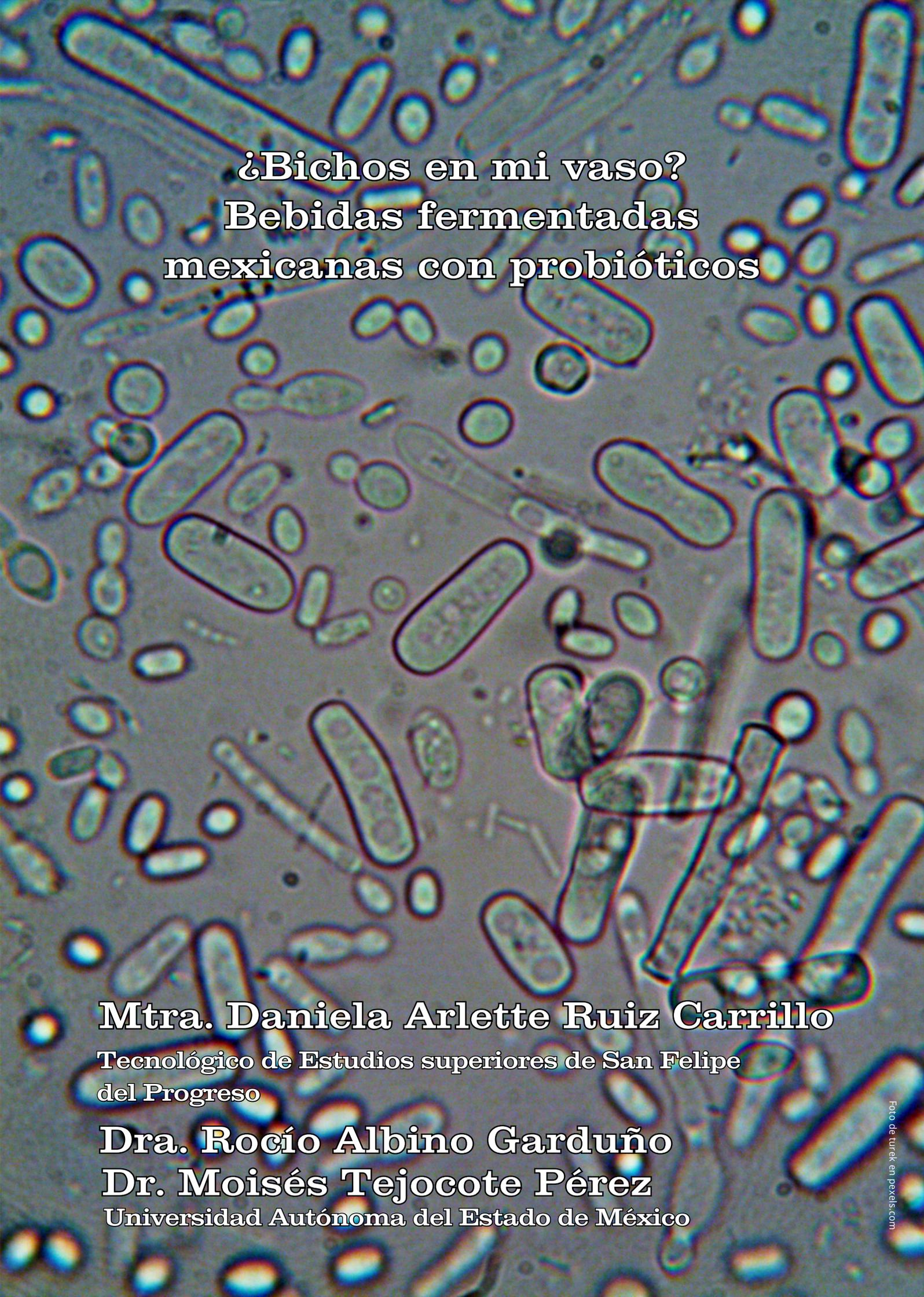
Tel. 5804-4600. Ext. 1144.

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.



**¿Bichos en mi vaso?  
Bebidas fermentadas  
mexicanas con probióticos**

**Mtra. Daniela Arlette Ruiz Carrillo**

Tecnológico de Estudios superiores de San Felipe  
del Progreso

**Dra. Rocío Albino Garduño**

**Dr. Moisés Tejocote Pérez**

Universidad Autónoma del Estado de México

## Abstract

Fermented beverages are products that contain probiotic microorganisms and essential, easily assimilable nutritional compounds available at a low cost. However, knowledge about the microbiological composition of fermented beverages is often insufficient, leading to a disregard for traditional Mexican gastronomy. The objective of this review is to present the beneficial properties associated with the probiotics that come with the consumption of fermented beverages in the daily diet. In this work, we seek to highlight the positive properties attributed to these beverages with the purpose of promoting their appreciation and consumption.

**Keywords:** fermentation, traditional gastronomy, microbiological composition, consumption.

## Resumen

Las bebidas fermentadas son productos que contienen microorganismos probióticos, fácilmente asimilables y disponibles a un bajo costo. Sin embargo, los conocimientos acerca de la composición microbiológica de las bebidas fermentadas a menudo son insuficientes. En este artículo buscamos evidenciar las propiedades positivas atribuidas a las bebidas fermentadas reconocidas en México, con el propósito de fomentar su apreciación y consumo.

**Palabras clave:** fermentación, gastronomía tradicional, composición microbiológica, consumo.

## Introducción

Las bebidas fermentadas mexicanas resultan de una interacción compleja entre tres componentes principales: materias primas, microorganismos responsables de la fermentación y la influencia humana en el desarrollo y

conservación de los productos finales. Durante el proceso de fermentación, las condiciones ambientales variables dan lugar a distintas calidades y características sensoriales en el producto final (Tamang *et al.*, 2020). El consumo de bebidas fermentadas ha sido una práctica arraigada en la historia humana, y las bebidas tradicionales fermentadas mexicanas son importantes en las comunidades originarias, debido a que su preparación, consumo y participación en festividades representan una conexión cultural-religiosa, convirtiéndolas en alimentos fermentados representativos de México y componentes esenciales de las dietas locales en diversas culturas (Tamang *et al.*, 2020).

Aunque los productos fermentados se utilizaban antes del conocimiento microbiológico, la ciencia actual está generando herramientas para identificar la importancia de los microorganismos probióticos presentes en estos productos. El consumo de alimentos fermentados está vinculado a beneficios para la salud, atribuibles a los microorganismos participantes en la fermentación. Cuando se incorporan a la dieta, estos microorganismos confieren beneficios a la salud del consumidor. La globalización y la falta de interés de las nuevas generaciones en conservar las tradiciones culinarias de México han llevado a un consumo reducido de estos productos tradicionales (Martínez-Cervantes *et al.*, 2019). Es crucial reconocer los beneficios derivados del consumo moderado de bebidas tradicionales mexicanas fermentadas, por ende, el objetivo de este trabajo evidenciar los beneficios para fomentar su apreciación y consumo.

## ¿Qué es la fermentación?

La fermentación es un proceso natural

mediante el cual los microorganismos, como las bacterias, las levaduras y los hongos, convierten los compuestos orgánicos como los azúcares y los almidones en sustancias más simples y, al mismo tiempo, generan energía. Dependiendo del microorganismo específico implicado, la fermentación puede producir varios productos finales (Camarena-Alvarado *et al.*, 2022). El alcohol, el ácido láctico, el ácido acético y el dióxido de carbono se encuentran entre las sustancias que se producen con mayor frecuencia a través de la fermentación. La fermentación es el proceso responsable de atribuir sabores y aromas característicos de las bebidas tradicionales, como el vino, la cerveza, el pulque, el mezcal y el tequila (Burini *et al.*, 2021). La fermentación puede darse de manera natural o inducida. La fermentación natural se produce cuando los microorganismos presentes en el ambiente inician el proceso de fermentación, mientras que la fermentación inducida se lleva a cabo agregando levaduras o cultivos definidos para obtener productos específicos (Burini *et al.*, 2021).

La fermentación láctica es un proceso biológico en el que ciertas bacterias convierten azúcares como la glucosa en ácido láctico. En el caso del yogur, la fermentación láctica se logra añadiendo ciertas cepas de lactobacilos a la leche, donde estas bacterias absorben los azúcares presentes y producen ácido láctico, dando como resultado la textura y sabor característico del yogur (Gan *et al.*, 2023). La fermentación alcohólica es un proceso biológico en el que microorganismos como la levadura convierten los azúcares en alcohol etílico y dióxido de carbono en un ambiente libre de oxígeno. La fermentación acética es un proceso biológico en el que las bacterias, especialmente las del género

*Acetobacter*, convierten compuestos alcohólicos como el etanol en ácido acético en presencia de oxígeno. Este proceso ocurre sin la presencia de azúcares fermentables y se caracteriza por la oxidación del alcohol para formar ácido acético y agua. En este proceso, los compuestos alcohólicos como el etanol se convierten en ácido acético, dando como resultado productos como el vinagre. Durante este proceso, además del ácido propiónico, se pueden formar otros compuestos como el ácido acético y el dióxido de carbono (Viroli *et al.*, 2021).

### **Bebidas tradicionales fermentadas en México**

Las bebidas tradicionales fermentadas mexicanas son de gran importancia cultural en México. Muchas de estas bebidas tienen una larga historia y son parte de la identidad y la tradición de diversas comunidades en el país. En la actualidad existe un gran número de alimentos fermentados que se preparan de manera regional de los cuales no se conocen sus características fuera de su lugar de origen (Ojeda-Linares, 2023). La variabilidad de ingredientes dentro de los procesos de elaboración y la diversidad de los conocimientos gastronómicos empleados pueden diferir y por ende resulta difícil tener un número exacto de estas bebidas (Fajardo-Argoti *et al.*, 2022).

Dentro de la historiografía de las bebidas embriagantes particularmente bajo procedimientos prehispánicos como la fermentación, su cuantificación ha sido en muchas ocasiones considerada inaccesible ya que muchos de los ingredientes y condiciones sociales e históricas han propiciado su transformación o desaparición (Rawat *et al.*, 2023). Se reconocen más de 100 bebidas fermentadas mexicanas. Entre las bebidas tradicionales fermentadas

mexicanas destacan el tepache, la tuba, el tescüino o tejuino, el pozol, el colonche, el balché, el pulque, el chorote, el *pox*, el atole agrio, el mezcal y la taberna, bacanora, sotol; todas estas consumidas en diversos puntos de la República Mexicana (Figura 1).

La variedad de ingredientes empleados en la preparación de las bebidas fermentadas tradicionales incluyen al maíz, agave, plantas, frutas y savia, que funcionan como materia principal dentro de su elaboración (Rawat *et al.*, 2023).



Figura 1: Sitios de preparación y consumo de bebidas fermentadas en México. Elaboración propia.

Dentro de las bebidas preparadas a base de maíz se encuentran el atole agrio, el tescüino, el *Sendechjo*, el chorote y el pozol. La preparación de las bebidas citadas se da principalmente en el centro y sur de México. Para preparar estas bebidas se emplean los conocimientos tradicionales, debido a que la gente emplea variedades de maíz específicas seleccionadas rigurosamente en base a sus propiedades generales que mejoraran el sabor de la bebida. Las bebidas tradicionales fermentadas elaboradas a base de maíz tienen una profunda relación con los grupos étnicos; estas bebidas se encuentran presentes en 21 grupos culturales de México (Rubio-Castillo *et al.*, 2021).

Entre las bebidas tradicionales elaboradas a base de agave se encuentra el pulque y el mezcal, el primero se obtiene a partir de la fermentación de la savia de *Agave salmiana* y el segundo se obtiene de la destilación y rectificación de mostos preparados directa y originalmente con los azúcares de las cabezas maduras de los agaves. Actualmente se emplean cerca de 68 especies de agave para la producción de pulque y mezcal. El pulque es utilizado dentro de festividades, rituales agrícolas, funerales y nacimientos; sin embargo, existe una disminución de la valoración por las nuevas generaciones (Rubio-Castillo *et al.*, 2021).

En México, se elaboran distintas bebidas fermentadas utilizando ingredientes como cereales (maíz, cebada y trigo), frutas (manzana, piña, tamarindo, tuna y cacao) y plantas (como la palma de coco (*Coccus nucifera*), la palma de coyol (*Acrocomia aculeata*) y varias especies de agaves). Al menos 17 especies de cactus son empleadas para elaborar la bebida fermentada colonche, éste es el nombre común de la bebida; sin embargo, en otras regiones del país mexicano es llamada *Nawait*. El colonche conocido regularmente como pulque rojo, es elaborado en diferentes épocas del año y depende completamente de la disposición de la materia prima (Martínez-Cervantes *et al.*, 2019).

Entre las bebidas fermentadas a base de frutas están el tepache y la sambumbia. El tepache es una bebida que se consume actualmente en el centro del país; el ingrediente principal es la piña; sin embargo, se puede preparar de manera tradicional con 10 variedades de plantas como manzana, guayaba y naranja. Esta bebida es similar a la sambumbia sin embargo se le añaden otros granos al igual que pulque y azúcar moreno para hacerlo sumamente atractivo al paladar. La tuba, es una bebida con características similares al pulque que se obtiene del aguamiel de maguey ya que son semejantes en cuanto al color, viscosidad, olor y sabor (Martínez-Cervantes *et al.*, 2019).

Algunas de las bebidas fermentadas tradicionales están en riesgo de desaparecer ya que su uso y consumo está siendo sustituido por bebidas industrializadas. En la categoría de en riesgo de desaparecer están bebidas como el *Sendechjo*, la tuba, el *pox*, la taberna y el colonche. Sin embargo, en los últimos años, ha surgido un interés por fomentar el reconocimiento

de las bebidas tradicionales fermentadas en muchas culturas alrededor de México. Estas bebidas se elaboran de manera artesanal, por ende, se emplean técnicas y conocimientos transmitidos de generación en generación, lo que las convierte en un patrimonio cultural intangible. De estas bebidas se han reconocido sus propiedades nutricionales, beneficios para la salud y su valor cultural e histórico en el país (Dávila-Ortiz *et al.*, 2022).

### **Probióticos**

Los probióticos son microorganismos vivos que ejercen acciones beneficiosas sobre funciones específicas para promover la salud del huésped cuando se administran en cantidades adecuadas (Ozen y Dinleyici, 2015). Los probióticos se encuentran en diversas presentaciones como alimentos fermentados, comprimidos, polvos o productos industriales como leches fermentadas, quesos, barras nutritivas, entre otros. Los efectos beneficiosos de los probióticos están asociados a la colonización o implantación de estos microorganismos en el cuerpo. La demanda de alimentos funcionales probióticos ha ido en aumento, ya que no solo contribuyen al mantenimiento del estado de salud general, sino que también pueden tener efectos beneficiosos adicionales, ya sea de manera preventiva o terapéutica. Aunque los productos fermentados eran consumidos antes del conocimiento en microbiología, hoy en día, la ciencia está avanzando y revelando la importancia de los microorganismos probióticos en diversos alimentos tradicionales fermentados (Ozen y Dinleyici, 2015).

Los avances científicos en el ámbito alimentario han generado nuevos conocimientos respecto a los beneficios de los microorganismos sobre la

microbiota del huésped; dichos avances avalan la necesidad de estos. salud óptima.

Los probióticos tienen un efecto directo sobre otros microorganismos patógenos. Este efecto resulta relevante en el tratamiento y prevención de enfermedades y en la restauración del equilibrio microbiano en el intestino del huésped. Los efectos de los probióticos se basan regularmente en acciones que afectan a las toxinas presentes en los alimentos (Negrete-Romero *et al.*, 2021).

### Prebióticos

Los prebióticos son fibras alimentarias no digeribles que actúan como alimento para los probióticos, microorganismos vivos beneficiosos para la salud. La sinergia entre prebióticos y probióticos es esencial para maximizar los beneficios que estos últimos aportan al organismo, promoviendo el crecimiento de los microorganismos probióticos, mejorando la salud digestiva y fortaleciendo el sistema inmunológico. Entre los ejemplos más comunes de prebióticos se encuentran la inulina, los fructooligosacáridos (FOS) y los galactooligosacáridos (GOS). La inclusión de prebióticos en la dieta favorece una microbiota intestinal equilibrada, lo que contribuye a una

### Bebidas fermentadas mexicanas y sus beneficios a la salud

Los alimentos fermentados tradicionales no solo han sido empleados con fines exclusivos al consumo. A medida que los grupos sociales culturales se fueron desarrollando se fomentó el intercambio de productos tradicionales por ende se le fueron otorgando valores ceremoniales, comerciales, curativos y culinarios. Las bebidas tradicionales mexicanas han sido de gran relevancia dentro de la vida diaria y ceremonial de numerosos grupos étnicos de México desde la época prehispánica en celebraciones y rituales humanos, litúrgicos y seculares (Negrete-Romero *et al.*, 2021).

Las bebidas tradicionales siempre resultan ser de interés en la rama de la microbiología ya que en ellas se encuentran múltiples colonias de microorganismos de interés en los cuales se destaca su identificación en diversas bebidas fermentadas tradicionales que aportan múltiples beneficios a la salud. A continuación, se presenta información respecto a las bebidas fermentadas tradicionales mexicanas, cepas aisladas beneficios a la salud (Tabla 1).

Tabla 1: Bebidas fermentadas y sus beneficios a la salud

Bebida	Descripción	Cepas Aisladas	Beneficios a la Salud	Referencia
Tuba	Savia de palma de cocotero	<i>Lactobacillus pentosus</i> , <i>Lactobacillus plantarum</i> y <i>Lactobacillus brevis</i>	Efecto inhibidor contra bacterias patógenas	(Martínez-Cervantes <i>et al.</i> , 2019)

Tepache	Cáscara de piña y azúcar moreno de caña	<i>Lactococcus lactis</i> , <i>Leuconostoc mesenteroides</i> y <i>Lactobacillus pentosus</i>	Produce un ácido idóneo para que el cólera no pueda hospedarse	(Gutiérrez-Sarmiento <i>et al.</i> , 2022)
Tesgüiño o tejuino	Bebida fermentada de maíz	<i>Lactobacillus plantarum</i> <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Actividad antagónica hacia los patógenos transmitidos por los alimentos	(Rubio- Castillo <i>et al.</i> , 2022)
Pozol	Bebida fermentada de masa de maíz	<i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>Lactobacillus fermentum</i> , <i>Leuconostoc citreum</i> y <i>Weisella confusa</i>	Ayudan a descomponer los alimentos y a absorber los nutrientes	(Velázquez-López <i>et al.</i> , 2018)
Colonche	Tuna roja cardona	<i>Lactobacillus fermentum</i> , <i>Bifidobacterium</i> y <i>Bacillus sp</i>	Reducción del riesgo de enfermedades gastrointestinales	(Ramírez-Guzmán <i>et al.</i> , 2019)
Pulque	Fermentación de la savia fresca del maguey (aguamiel)	<i>Lactobacillus casei</i> , <i>Leuconostoc mesenteroides</i> , <i>Leuconostoc citreum</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i> y <i>Zymomonas mobilis</i>	Propiedades antiinflamatorias, reducción de la pérdida de peso	(Escalante <i>et al.</i> , 2016)
Atole agrio	Bebida elaborada a base de maíz, canela	<i>Lactobacillus lactis</i> , <i>Pediococcus</i> y <i>Weisella confusa</i>	Refuerzo a la barrera intestinal, competencia con patógenos, producción de vitaminas	(Väkeväinen <i>et al.</i> , 2020)
Chorote	Maíz cocido y cacao tostado y molido	<i>Lactobacillus</i> , <i>Leuconostoc</i> , <i>Gluconacetobacter</i> , <i>Sphingomonas</i>	Propiedades antiinflamatorias y reducción de la pérdida de peso	(Scarpa y Pacor, 2017)
Balché	Corteza del árbol balché, miel, canela y anís	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> y <i>Lactobacillus fermentum</i>	Efecto inhibitorio contra bacterias patógenas	(Avilés- Peraza, 2015)

Pox	Caña de azúcar, maíz, piloncillo y salvado de trigo	No identificado	No identificado	(Méndez Hernández, 2020)
Mezcal	Diferentes especies de agave	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Lactobacillus plantarum</i> y <i>Lactobacillus kefir</i>	Mejora la digestión y regula el colesterol Favorece la circulación sanguínea.	(Parascanu <i>et al.</i> , 2021)
Taberna	Savia de la palma de coyol	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> y <i>Lactobacillus fermentum</i> ,	Previene enfermedades gastrointestinales	(Camacho Vera <i>et al.</i> , 2019)

Fuente: Elaboración propia con base en los autores

### Conclusión y prospectiva

Resulta importante destacar los beneficios de las bebidas tradicionales fermentadas ya que en ellas se encuentra una gran diversidad de microorganismos probióticos. En general las bebidas fermentadas ayudan a la prevención de enfermedades transmitidas por alimentos, mejoran el funcionamiento de la flora intestinal de los consumidores habituales (dosis moderadas); sin embargo, las nuevas generaciones desconocen la importancia cultural y nutritiva de las bebidas tradicionales fermentadas.

Destacamos la importancia de las bebidas fermentadas como reservorios de diversidad biológica, y su relevancia como patrimonio biocultural mexicano que confiere identidad a grupos culturales como paisajes alimentarios únicos y diversos. Aspiramos, además, a aportar información útil para el diseño

de estrategia para su preservación. Se puede visualizar que la tendencia investigativa y de mercado actual está marcadamente dirigida hacia las bebidas agrupadas en la categoría de licores de agave o sus destilados, referidos en este estudio como mezcal, en comparación con el resto de las bebidas fermentadas tradicionales en la literatura consultada.

Se espera que en el futuro haya un aumento en la investigación y documentación de otras bebidas fermentadas tradicionales, más allá de las agrupadas en la categoría de licores de Agave. Esto puede incluir la identificación y descripción de nuevas variedades, así como la evaluación de su impacto en la diversidad biocultural y alimentaria.

### Referencias

- [1] Avilés-Peraza, G.C. (2015) 'Balché (Lonchocarpus longistylus): árbol

- mágico, usos ceremoniales y medicinales', *Desde el Herbolario CICY*, 7, pp. 46–48.
- [2] Burini, J.A. *et al.* (2021) 'Levaduras no convencionales como herramientas de innovación y diferenciación en la producción de cerveza', *Revista Argentina de Microbiología*, 53(4), pp. 359–377.
- [3] Camacho Vera, J.H. *et al.* (2019) 'Los alimentos artesanales y la modernidad alimentaria', *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 29(53).
- [4] Camarena-Alvarado, I. *et al.* (2022) 'Probióticos como suplemento alimenticio y su efecto en enfermedades gastrointestinales', *Acta de Ciencia en Salud*, (16), pp. 27–37.
- [5] Escalante, A. *et al.* (2016) 'Pulque, a traditional Mexican alcoholic fermented beverage: historical, microbiological, and technical aspects', *Frontiers in microbiology*, 7, p. 1026.
- [6] Fajardo-Argoti, I.-C., Jurado-Gámez, H.-A. And Parra-Suescún, J.-E. (2022) 'Viabilidad probiótica y capacidad de inhibición de *L. gasseri* microencapsulada en *L. monocytogenes* y *S. aureus*', *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 20(2), pp. 87–101.
- [7] Gan, J. *et al.* (2023) 'Effect of fermentation using different lactic acid bacteria strains on the nutrient components and mineral bioavailability of soybean yogurt alternative', *Frontiers in Nutrition*, 10.
- [8] Gutiérrez-Sarmiento, W. *et al.* (2022) 'Microbial community structure, physicochemical characteristics and predictive functionalities of the Mexican tepache fermented beverage', *Microbiological Research*, 260, p. 127045.
- [9] Martínez-Cervantes, M. *et al.* (2019) 'Valor Funcional de Bebidas Tradicionales Con Posible Potencial Prebiótico', *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 11(22).
- [10] Méndez Hernández, L. (2020) 'Determinación De Los Parámetros De Etanol En El Proceso De Fermentación Y Destilación Para La Producción Artesanal De Pox Con Sabor'.
- [11] Negrete-Romero, B. *et al.* (2021) 'Nutritional contributions and health associations of traditional fermented foods', *Fermentation*, 7(4), p. 289.
- [12] Ojeda-Linares, C.I., Vallejo, M. and Casas, A. (2023) 'Disappearance and survival of fermented beverages in the biosphere reserve Tehuacán-Cuicatlán, Mexico: The cases of Tolonche and Lapo',

- Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, p. 1067598.
- [13] Ozen, M. and Dinleyici, E. (2015) 'The history of probiotics: the untold story', *Beneficial microbes*, 6(2), pp. 159–165.
- [14] Parascanu, M.M. *et al.* (2021) 'Environmental and economic analysis of bioethanol production from sugarcane molasses and agave juice', *Environmental Science and Pollution Research*, 28, pp. 64374–64393.
- [15] Ramírez-Guzmán, K.N. *et al.* (2019) 'Traditional fermented beverages in Mexico', in *Fermented beverages*. Elsevier, pp. 605–635.
- [16] Rawat, M. *et al.* (2023) 'A comprehensive review on nutraceutical potential of underutilized cereals and cereal-based products', *Journal of Agriculture and Food Research*, p. 100619.
- [17] Rubio-Castillo, Á.E. *et al.* (2021) 'Tejuino, a Traditional Fermented Beverage: Composition, Safety Quality, and Microbial Identification', *Foods*, 10(10), p. 2446.
- [18] Rubio-Castillo, Á.E. *et al.* (2022) 'Gut metabolites produced during in vitro colonic fermentation of the indigestible fraction of a maize-based traditional Mexican fermented beverage, Tejuino', *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 5, p. 100150.
- [19] Scarpa, G.F. and Pacor, P. (2017) '¿Por qué ya no recolectan los recolectores?: Procesos de estigmatización del consumo de plantas silvestres entre los indígenas chorote del Chaco salteño', *Runa*, 38(1), pp. 05–21.
- [20] Tamang, J.P. *et al.* (2020) 'Fermented foods in a global age: East meets West', *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(1), pp. 184–217.
- [21] Väkeväinen, K. *et al.* (2020) 'Effect of different starter cultures on the sensory properties and microbiological quality of Atole agrio, a fermented maize product', *Food Control*, 109, p. 106907.
- [22] Velázquez-López, A. *et al.* (2018) 'Bebida fermentada elaborada con bacterias ácido lácticas aisladas del pozol tradicional chiapaneco', *CienciaUAT*, 13(1), pp. 165–178.
- [23] Viroli, S.L.M. *et al.* (2021) 'Production and characterization of acetic fermentation with different fruit peels', *Research, Society and Development*, 10(14), pp. e84101421878–e84101421878.



# Superfibras tejiendo el futuro

**Dr. Daniel Alcalá Sánchez**  
**Dr. Juan Carlos Tapia Picazo**  
Tecnológico Nacional de México  
Instituto Tecnológico de Aguascalientes

**Abstract**

Smart fibers represent an advanced generation of materials that offer innovative and sustainable solutions in the evolution of textile fabrics. Smart fibers respond in a controlled and predictable manner to stimuli caused by changes in temperature, pH, electrical energy, pressure, humidity, light exposure, and more. Their responsiveness is primarily attributed to their composition and preparation methods. The types of intelligence that a fiber material can exhibit are not dissimilar to the various forms of intelligence observed in humans. In an analogous way, this document weaves a correlation between psychological intelligences and the different forms of intelligence present in fibers, threads, or textiles. Additionally, it introduces a fabric that reflects cutting-edge ideas and pioneering contributions in the design and application of these fascinating, challenging, and futuristic materials.

**Keywords:** smart fibers, smart textiles, artificial intelligence, sustainability

**Resumen**

Las fibras inteligentes representan una avanzada generación de materiales que brindan soluciones innovadoras y sostenibles en la evolución de los tejidos textiles. Las fibras inteligentes responden de manera controlada y predecible a estímulos causados por cambios en la temperatura, el pH, la energía eléctrica, la presión, la humedad, la exposición a la luz, etc. Las fibras inteligentes deben su capacidad de respuesta principalmente a su composición y los métodos de preparación. Las formas de inteligencia que puede tener un material en forma de fibra, no son ajenas a diferentes tipos de inteligencia de los seres humanos. De manera análoga, en este documento

se entreteje una correlación entre inteligencias psicológicas y distintas inteligencias de una fibra, un hilo o un textil. Además se presenta un tejido que refleja ideas vanguardistas y contribuciones pioneras en el diseño y aplicación de éstos fascinantes, desafiantes y futuristas materiales.

**Palabras clave:** fibras inteligentes, textiles inteligentes, inteligencia artificial, sustentabilidad

**Introducción**

La inteligencia humana ha permitido la creación y el desarrollo de innovaciones que transforman nuestra vida diaria, y una de las áreas más impactadas por esta evolución es la de las fibras con que se fabrican los textiles. Las fibras, durante mucho tiempo se utilizaron simplemente para satisfacer nuestras necesidades básicas de vestimenta y abrigo. Pero hoy en día, se habla de fibras inteligentes, que tiene la capacidad de adaptarse y responder a diferentes escenarios.

Las fibras tradicionales, que son obtenidas a partir de materiales convencionales como el algodón, la lana y el poliéster, ofrecen la bondad de ser generalmente económicas y están ampliamente disponibles debido a su producción en masa; sus propiedades fisicoquímicas son bien conocidas y documentadas, lo cual facilita su aplicación; y los procesos de fabricación son ampliamente conocidos y estandarizados, garantizando una calidad consistente. Actualmente, el uso de las fibras convencionales pende de un hilo, en su preparación y después de su vida útil se suelen generar grandes cantidades de residuos; en los procesos de producción se requieren altos niveles de agua, de energía y para el teñido se utilizan productos químicos nocivos, lo que contribuye

al deterioro ambiental y agotamiento de recursos naturales; algunas fibras pueden degradarse rápidamente con el uso y el lavado, reduciendo la vida útil del producto. Los textiles a partir de fibras convencionales no tienen la capacidad de adaptarse a cambios en el entorno o responder a estímulos externos, lo que limita su funcionalidad en ciertas aplicaciones.

En contraste a las fibras convencionales, ha emergido una nueva era de materiales inteligentes en forma de fibra que son capaces de adaptarse a diversas condiciones y responder a estímulos externos. Con estas fibras (no convencionales), se pueden crear textiles que no solo mejoran nuestra comodidad, sino que también promueven un enfoque más sustentable, al optimizar recursos y reducir el impacto ambiental. En una sociedad donde la ciencia, la tecnología y la inteligencia artificial se entrelazan con nuestras vidas de maneras cada vez más sofisticadas, las fibras inteligentes representan un puente entre la innovación y la sustentabilidad. Pero el diseño, fabricación y aplicación de las fibras inteligentes aun enfrenta ciertos desafíos de carácter económico, disponibilidad, circularidad e impacto ambiental. Las fibras inteligentes suelen ser más costosas de producir debido a la tecnología avanzada, los procesos complejos y materiales especiales que se requieren, lo que puede dificultar la escalabilidad y la producción en masa; su alto costo puede limitar el alcance de los consumidores, limitando su adopción generalizada; los textiles inteligentes pueden presentar dificultades de reciclaje y tener un tiempo de vida útil limitado por la integración de componentes electrónicos o materiales compuestos; además los materiales especiales en fibras inteligentes pueden

tener su propio impacto ambiental debido a la extracción de recursos raros o procesos de fabricación que no son completamente sostenibles.

Si bien, las fibras inteligentes aún con los desafíos que enfrentan, ofrecen soluciones avanzadas y sustentables. Pero es necesario realizar más actividad científica y de investigación para tener una mejor comprensión de la inteligencia de estas fibras y su respuesta a estímulos del entorno, con ello generar nuevas ideas, nuevas estrategias y nuevas aplicaciones que hagan frente a los desafíos que el futuro nos está preparando. En el entretejido de este documento, se presenta un panorama muy general acerca de las fibras inteligentes y como sus cualidades de inteligencia se puede relacionar, de manera análoga, a diferentes tipos de inteligencia asociados a los seres humanos. Así mismo, se ofrecen novedosas ideas en el campo de fibras inteligentes que son la unidad básica para la elaboración de hilos inteligentes y con ellos tejer el futuro.

### **Agarrando el hilo sobre fibras y textiles**

Una fibra es un material que se caracteriza por ser muy flexible, muy fino y que tiene una relación muy alta entre su longitud y su espesor (Hu *et al.*, 2020). El concepto de fibra es muy amplio y suele estar relacionado en el campo alimenticio como la fibra dietética, o bien, en el área de salud como las fibras musculares. En el contexto del presente artículo, el término de fibra, ha de referirse a la unidad principal para la construcción de hilos y de telas o tejidos textiles. Las fibras pueden agruparse en dos grandes grupos de acuerdo a su origen: fibras naturales y fibras químicas o fibras hechas por el

hombre. Las fibras naturales pueden extraerse de las plantas o de los animales y son generadas mediante lentos procesos genéticos. También existen fibras minerales naturales que son resultado de procesos geológicos. En el grupo de las fibras químicas

hay una gran variedad de ejemplos como las fibras regeneradas, sintéticas, inorgánicas, etc. y tienen el común denominador en que para su obtención, la mano del hombre se ve involucrada. En la Figura 1, se presentan diferentes tipos de fibras según su origen.



Figura 1: Tipos de fibras y su origen

Un textil es una estructura que resulta de entrelazar fibras, hilos o una combinación de ambos. Los textiles pueden ser identificados como telas tejidas o telas no tejidas. Lo más común es encontrar textiles en dos dimensiones, pero los avances tecnológicos han permitido realizar textiles en 3D con aplicaciones técnicas, ingenieriles, médicas, etc. y los textiles en 4D que se refieren a textiles híbridos que pueden cambiar de forma y función mediante un estímulo ambiental (Manaia *et al.*, 2023).

El concepto de que “no todos los tipos de fibras pueden ser utilizadas

para elaborar hilos y/o textiles”, hasta hace algunas décadas fue un paradigma y un factor limitante en el desarrollo de nuevas tecnologías, ya que se consideraba que dentro de las principales propiedades y características que debe tener una fibra o filamento para ser útil en la elaboración de hilos y textiles se encuentra la longitud mínima, que “debería” ser al menos de 5 mm, la alta flexibilidad, la suficiente resistencia mecánica y durabilidad. Sin embargo, gracias a la integración de diversas disciplinas (como bioquímica, electrónica, tecnología

de la información, salud, etc.), los avances científicos y tecnológicos (como la nanotecnología, semiconductores, biotecnología, etc.) ha emergido una nueva generación de materiales y técnicas que permiten desarrollar textiles a niveles nanométricos, con propiedades, características y funcionalidades específicas y que son integrados a la familia de materiales recientemente reconocidos como **materiales inteligentes**.

### **Fibras, hilos y textiles ¿inteligentes?**

El calificativo de “material inteligente” es un tema inquietante en la comunidad científica debido al significado literal del término **inteligencia**, pues cuestiona el ¿cómo un material puede ser inteligente?, la Real Académica Española (RAE) define a la inteligencia como la capacidad de adquirir, comprender y aplicar conocimiento y habilidades, razonar, resolver problemas, tomar decisiones y adaptarse a nuevas situaciones. Aunque ésta definición esta directamente relaciona a cuestiones psicológicas, educativas y neurológicas; ha sido posible hacer la selección de algunas palabras que definen a la inteligencia y aplicarlas en la ciencia de materiales. Hasta ahora, los científicos han coincidido en una forma para definir lo que es un material inteligente: un material inteligente es aquel que tiene la capacidad de responder de manera contralada y predecible a estímulos ambientales tales como: térmicos, químicos, magnéticos, energéticos, eléctricos, mecánicos, etc.

Los materiales inteligentes pueden ser duros, flexibles, blandos e incluso fluidos. Un material inteligente en forma de fibra, identificado como “**fibra inteligente**”, se refiere a una fibra que ha sido diseñada especialmente para

percibir y emitir una respuesta de un estímulo externo. La fibra inteligente puede tener funciones de detección, retroalimentación, reconocimiento, almacenamiento de información, respuesta, autodiagnóstico, autoajuste y autorreparación. Las fibras inteligentes deben su mecanismo de respuesta principalmente a la composición química y al procedimiento de preparación. Las principales materias primas para la elaboración de fibras inteligentes son los materiales metálicos, los materiales inorgánicos no metálicos y los materiales poliméricos funcionalizados (Wang *et al.*, 2020). Para no perder el hilo, con las fibras inteligentes se pueden elaborar **textiles inteligentes**, o bien, se pueden hacer **hilos inteligentes** que después son usados para la construcción de textiles inteligentes. El término de textil inteligente, no se refiere únicamente a aquel tejido elaborado con fibras o hilos inteligentes, sino que también se usa para describir a los tejidos (textiles) que gracias a la integración de herramientas, dispositivos y/o sensores digitales específicos, adquieren de manera complementaria la capacidad para responder a estímulos ambientales e interactuar con el usuario final (Giannuzzi *et al.*, 2022).

### **Hilatura de la inteligencia de los humanos y las fibras**

La serie de formas de la inteligencia en términos psicológicos, las cuales definen en cómo la persona analiza, evalúa, aplica conocimientos y responde a las circunstancias del entorno, no son ajenas a las cualidades de inteligencia de los materiales inteligentes en forma de fibra. Es decir, los diferentes tipos de inteligencia establecidos por psicólogos como Robert J. Sternberg y Howard Gardner (inteligencia analítica, práctica, creativa, lógica, cognitiva, social, emocional, etc.) pueden ser

extrapolados a la ciencia de materiales y con ello entender, de manera análoga, la forma en que responden las fibras inteligentes a diferentes estímulos o condiciones del ambiente. En ciencia de materiales, se han definido diferentes términos que expresan la “inteligencia” que puede tener un material, como por ejemplo: la memoria de forma, fotocromía, fotoluminiscencia, autorreparación, etc. los cuales pueden ser asociados o relacionados a los diferentes tipos de inteligencia psicológica (Dang *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020).

Por ejemplo, la **inteligencia cognitiva o analítica**, ayuda a describir la capacidad que se tiene para captar, almacenar, modificar y trabajar con la información. Con ello, se pueden tomar decisiones y generar soluciones efectivas. Una fibra inteligente puede experimentar cambios en su forma o estructura cuando se expone a perturbaciones externas como la temperatura, la luz, el pH o la presión. Cuando la fibra se aísla de esas perturbaciones y recupera su forma y estructura original, entonces se dice que la fibra tiene la **inteligencia de memoria de forma**.

Existen fibras inteligentes que tiene la capacidad para captar y almacenar energía. Este tipo de fibras se dice que tiene la **inteligencia de cambio de fase**. En este tipo de fibras, la energía puede ser asumida como información que será utilizada para tomar decisiones, ya que además de captarla y almacenarla, también la puede convertir, por ejemplo convierte la energía solar en energía térmica.

La energía (información) almacenada, que también puede provenir del entorno, puede ser liberada mediante calor latente (cambio de fase)

y ser aprovechada en distintas aplicaciones. En el proceso de captación, almacenamiento y liberación (distribución) de energía, se puede llevar a cabo la función de termorregulación, donde la fibra evita que la temperatura aumente o disminuya fuera de rangos establecidos. La **inteligencia emocional**, nos habla sobre la capacidad que se tiene frente al reconocimiento y comprensión de las emociones, al autocontrol, automotivación y la forma de actuar bajo situaciones de estrés y presión. Existen diferentes fibras inteligentes que se pueden asociar a la inteligencia emocional desde el punto de vista de los cambios internos (en las entrañas) de una fibra frente a una situación causada por el entorno. Las fibras con **inteligencia de autorreparación**, son aquellas que después de haber sufrido daños en sus propiedades estructurales o funcionales, han tenido la capacidad de repararse por sí mismas, dando como resultado fibras inteligentes “mejoradas” y más “fuertes” ante las adversidades, un tipo de inteligencia que no está muy alejado del concepto de resiliencia. Existen las fibras con **inteligencia de sensibilidad al pH**, la cual se refiere la capacidad que tienen las fibras (comúnmente fibras de gel) que cambian de volumen o forma con los cambios de pH. Este cambio se basa en la respuesta de la fibra cuando se estimula a nivel molecular, nivel macromolecular y nivel intermolecular. Hay otro tipo de inteligencia que pueden tener las fibras, la **inteligencia de autolimpieza**. Este tipo de inteligencia consiste en la capacidad que tiene la fibra para eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos a partir fotocatálisis (cuando se degrada la materia orgánica con aplicación de la luz natural), de una superficie superhidrofóbica (cuando las gotas de

un líquido se forman y ruedan sobre la superficie de la fibra, llevándose la suciedad y la mugre con ellas), o bien, por tecnología de microondas (cuando la fibra tiene nanopartículas sensibles a la radiación de microondas, las cuales generan calor que descompone los contaminantes). Esta capacidad de las fibras es muy parecida al autocontrol y autoestima que tienen las personas al enfrentarse a situaciones donde las emociones son comprometidas por un agente externo que las quiere alterar. Si bien, la alteración de las emociones puede ser positiva o negativa. Cuando una persona es afectada en sus emociones de manera positiva (por ejemplo con un reconocimiento, un premio, con la letra de una canción, con un recuerdo de la niñez, etc.), las perspectivas se amplían y el individuo se siente bien, genera conexiones y reluce su creatividad emitiendo una especie de luz o radiación que genera alegría. Hay fibras que pueden experimentar un fenómeno muy parecido, esas fibras están dotadas con la **inteligencia de fotoluminiscencia**. Cuando los estados electrónicos de los componentes de la fibra inteligente (nuevamente las entrañas de la fibra) son excitados por alguna fuente de energía externa (estímulo externo positivo), éstos gastan energía para regresar a su estado fundamental, durante este proceso, la energía se libera emitiendo luz visible. Por otro lado, cuando un individuo es afectado en sus emociones de manera negativa (por ejemplo la presión social), puede responder de manera optimista (positiva) o de manera pesimista (negativa). Tal es el caso de las fibras con **inteligencia piezoeléctrica**. Este tipo de fibras inteligentes tienen la capacidad de responder mediante la generación de energía eléctrica, cuando son sometidas a una tensión mecánica (como presionar,

doblar o torcer); aquí la fibra responde (positivamente) dando energía, ante una alteración de su estructura interna. Por su parte, también pueden actuar de manera inversa, cuando se le aplica un voltaje a la fibra (es decir, cuando se le proporciona energía), esta responde plegándose, estirándose o bien desfigurándose (respuesta “pesimista-negativa”).

También se habla de **inteligencia creativa**. Este tipo de inteligencia nos descubre la capacidad que se tiene para generar nuevas y originales ideas y pensar en múltiples soluciones para resolver uno o varios problemas a partir de la experiencia. Hoy por hoy, se pudiera decir que todos los tipos de fibras inteligentes gozan de inteligencia creativa debido a la relativa novedad de estos materiales. Sin embargo, es posible hacer una breve selección de fibras inteligentes en base a su forma creativa de responder ante algún estímulo del entorno. Por ejemplo, las fibras con **inteligencia electrocrómica y fotocrómica**, tienen la capacidad de cambiar de color, opacidad o transparencia cuando experimentan el paso de una corriente eléctrica o se exponen a una fuente de luz, respectivamente. Las fibras electrocrómicas, responden cambiando de color cuando se someten a un proceso de reducción (ganancia de electrones) o de oxidación (pérdida de electrones). Mientras que las fibras fotocrómicas, deben su capacidad de cambiar de color cuando la estructura molecular o los niveles de energía electrónica, son alterados bajo la irradiación de luz ultravioleta o luz visible. Un estímulo externo de gran importancia es la humedad ambiental. Las fibras con la **inteligencia de sensibilidad a la humedad**, tienen la capacidad de cambiar sus propiedades físicas (se expanden o contraen) en respuesta a los

cambios de humedad del ambiente. Este tipo de inteligencia está estrechamente relacionada a la inteligencia de memoria de forma. Así mismo, se puede relacionar a otra inteligencia conocida como **inteligencia de actuador**. La capacidad de estas fibras se basa en que poseen comportamientos de motores dinámicos en respuesta a estímulos externos no solo de humedad, sino también de temperatura, electricidad, campos magnéticos, pH, etc. Las fibras con inteligencia de actuador pueden expandirse, contraerse o deformarse de acuerdo al estímulo externo recibido. Existen también las fibras con **inteligencia saludable**, las cuales son dotadas con la capacidad de ayudar a mantener la salud humana mediante una función antibacterial, antimicrobial y/o desodorantes. Este tipo de fibras inhiben o matan los microorganismos o bacterias que se encuentran en la superficie de los tejidos. La forma en que se pueden asociar estas fibras inteligentes a la inteligencia creativa, no solo radica en la forma de actuar si no en la gama de aplicaciones en que pueden ejercer y explotar sus capacidades.

Otra de las inteligencias que se puede relacionar a la ciencia de materiales es la **inteligencia social**, la cual presenta la capacidad que se tiene para la interacción y comunicación efectiva con otros, el trabajo colaborativo y la adaptación a diferentes contextos sociales y culturales. Una de las fibras inteligentes relacionada íntimamente con la inteligencia social es aquella que goza de **inteligencia conductora**. Este tipo de fibras, además de tener la capacidad para transferir datos y energía, son la base para desarrollar textiles innovadores que permiten la interacción y comunicación con el entorno y el usuario final. Las fibras inteligentes conductoras pueden estar

constituidas de materiales metálicos como la plata, cobre, níquel, etc. o materiales orgánicos como la fibra de carbono. Sin embargo, existen las fibras de origen polimérico que incorporan en su estructura y método de preparación componentes microelectrónicos (microchips, microsensores, nanomateriales, semiconductores, etc.) que colaboran en la inteligencia conductora de la fibra.

Como se mencionó anteriormente, la inteligencia de un material en forma de fibra, va a estar definida en base a su composición química y los métodos usados para su preparación. La selección de los materiales para determinar la inteligencia de una fibra se realiza de manera avanzada y en función de satisfacer necesidades básicas o específicas. Por citar ejemplos, en la Tabla 1 se presentan algunos tipos de fibras y sus principales aplicaciones (Hu *et al.*, 2020; Ornaghi *et al.*, 2022). Las fibras inteligentes que se han mencionado anteriormente son solo algunos ejemplos de la gran gama de materiales inteligentes en forma de fibra, pero con el creciente avance de la tecnología y la ciencia, los atributos de inteligencia impartidos a las fibras va en aumento.

### **Entretejiendo la inteligencia artificial**

La inteligencia artificial (IA) y su integración en los diferentes sectores de la sociedad, aumenta día con día. En ciencia de los materiales, no puede ser excluida la relación que existe entre los materiales inteligentes y la IA puesto que no solo tiene en común el término de inteligencia. A pesar de que se trata de un tema complejo, que hasta el momento presenta una gran frescura, es posible reconocer el gran potencial que tienen estas dos áreas para el desarrollo científico-tecnológico y social.

Tabla 1: Fibras inteligentes y sus aplicaciones

<b>Fibras Inteligentes</b>	<b>Aplicaciones</b>
Con memoria de forma	Dispositivos médicos, actuadores, sistemas de fijación, trajes impermeables, trajes transpirables, hilos quirúrgicos, amortiguadores, etc.
Con cambio de fase	Almacenamiento de energía térmica, sistemas de climatización, ropa deportiva, trajes impermeables, trajes transpirables, camas y almohadas de hospital, ropa y mantas termorreguladoras, etc.
Autorreparables	Recubrimientos, adhesivos, materiales compuestos, componentes aeroespaciales, electrónicos, etc.
Autolimpiables	Ropa deportiva, telas decorativas, protectores superficiales como vidrios o espejos, prendas hospitalarias, uniformes militares, tapicería, ropa interior, etc.
Fotoluminiscentes	Detectores, textiles decorativos, trajes de protección personal, chalecos salvavidas, ropa deportiva, etc.
Piezoeléctricas	Sensores, actuadores, dispositivos de generación de energía, etc.
Electrocromáticas	Ventanas inteligentes, espejos antirreflejos, pantallas, textiles decorativos, trajes de protección personal, etc.
Fotocromáticas	Material de detección, gafas solares, textiles decorativos, trajes de protección personal, etc.
Sensibles a la humedad	Ropa deportiva, sensores de humedad, actuadores, trajes de protección personal, etc.
Saludables	Telas para ropa de uso médico, deportivo, vendajes, trajes de protección personal, trajes y telas de uso militar, sistema de purificación de agua (filtros), etc.
Conductora	Electrónica, textiles con receptores GPS, transistores, tecnología aeroespacial, materiales compuestos, sistemas de cableado, aplicaciones medicas, militares, antenas, ropa térmica, etc.

Las capacidades de las fibras inteligentes pueden ser utilizadas integrándolas a sistemas controlados y gestionados por la IA para optimizar el rendimiento y funcionalidad de textiles inteligentes en tiempo real. Las fibras con inteligencia de actuador o con memoria de forma, por ejemplo, pueden hacer la función de sensores, a partir de los cuales la IA podrá tomar la información para procesarla y tomar decisiones y soluciones automatizadas. En el campo de la medicina, una fibra con inteligencia auxética (una fibra con capacidad de expandirse en todas las direcciones cuando es estirada), puede

ser utilizada como un dispositivo para la liberación de fármacos y la IA puede mejorar la precisión y la efectividad de la liberación del fármaco.

Una fibra con inteligencia conductora, fotocromática, electrocromática, o bien, la integración de dispositivos electrónicos en textiles inteligentes, pueden usarse como sensores para monitorear signos vitales como la respiración, frecuencia cardiaca, niveles de glucosa, etc. que proporcionan datos a un sistema de IA que son analizados para detectar patrones anormales, con ello tomar medidas de alerta emergentes. Con las

fibras con memoria de forma, se pueden construir trajes para la rehabilitación motriz de algún paciente y proporcionar información acerca de la correcta realización de ejercicios terapéuticos mediante un sistema de IA.

El comportamiento de una fibra inteligente en respuesta a un estímulo externo puede ser ajustado mediante sistemas de IA. Por ejemplo, en una playera deportiva hecha de fibras con inteligencia de cambio de fase para regular la temperatura corporal, la IA ajustaría la permeabilidad de la playera mediante la retroalimentación de la información.

Con los textiles inteligentes es posible generar interfaces táctiles que generen señales interpretables por la IA para controlar dispositivos electrónicos. Además, se pueden integrar otros dispositivos como relojes, gafas de realidad aumentada, calzado, etc. con el fin de crear ecosistemas inteligentes de tecnología vestible. Los textiles inteligentes pueden utilizarse para desarrollar equipos de protección personal que son monitoreados mediante IA, la cual después de analizar los datos, pondrá en alerta al usuario sobre peligros potenciales del entorno y realizará ajustes de protección. Por ejemplo, trajes de uso militar que pueden monitorear el estado físico de los soldados o las condiciones medioambientales y que mediante el análisis por IA se favorecerá la toma de decisiones en el campo.

Tal vez, la escasa información que con que se cuenta hasta ahora, sea el único factor limitante para comprender profundamente el vínculo que existe o que puede existir entre las fibras inteligentes y la IA, se pudiera traer al texto la común frase de que la “la imaginación es el límite”

para darnos cuenta del potencial de transformar la industria, generar soluciones innovadoras a problemas complejos y mejorar la calidad de vida, a través de la consolidación en la relación entre los materiales inteligentes en forma de fibra y la IA.

### **Tejiendo la fina inteligencia de las fibras y los aportes pioneros**

Si las disciplinas de la tecnología son los hilos que conforman un tejido textil, entonces la ciencia y la investigación son el telar donde se entrelazan esos hilos. En el telar se generan las novedosas ideas que permiten la construcción de tejidos que reflejan la inquietud del ser humano por satisfacer sus necesidades, y ahora más que nunca, satisfacer esas necesidades de una manera sustentable y amigable con el medio ambiente. Muchas ideas para otorgar cualidades de inteligencia en forma de fibras han sido planteadas y aunque algunas parecieran ser algo imposible, retan la mente, la creatividad y la inteligencia del ser humano para hacer posible lo que parece imposible. Por ejemplo, fibras inteligentes con tecnología Lifi, una prenda de uso común que permita la conexión a internet; fibras con tecnología portátil y personalizada que permitan almacenar energía solar y la puedas aprovechar en la recarga de algún dispositivo móvil. Las recientes fibras con inteligencia electrónica portátil que se están utilizando como baterías, las cuales exhiben una excepcional tolerancia al estrés mecánico, portabilidad, flexibilidad y adaptabilidad a la deformación. Fibras inteligentes, que adapten su color de acuerdo a tu tono de piel y a la luz a la que nos exponamos y ayuden a definir mejor los rasgos faciales. Fibras con la inteligencia de avisar cuando se va a tener un infarto o un ataque de ansiedad y que además

estimulen al sistema nervioso para causar una respuesta tranquilizante. Textiles inteligentes que suministren medicamentos según el cuerpo lo requiera, ropa que pueda detectar lesiones musculares o malestares con los bebe, y pensar que algunas fibras inteligentes de este tipo ya se encuentran disponibles en el mercado.

Las fibras inteligentes con carácter de sustentabilidad tienen un gran potencial de desarrollo. Considerando que la composición de una fibra es una de las principales determinantes de la inteligencia que se adquiere, no solo se debe poner atención a la estructura química y física de compuestos orgánicos o inorgánicos para la síntesis de nuevos materiales; el aprovechamiento de residuos como materia prima y la modificación de fibras de origen natural, son otras áreas que contribuyen a la remediación del deterioro ambiental y a frenar el uso de recursos no renovables.

Tal es el caso del aporte (en éste concepto) que se realiza por parte del científicos del Laboratorio de Investigación de Polímeros del Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Aguascalientes, que en colaboración con centros de investigación como el CINVESTAV, el CICY y el IPICYT, se encuentran desarrollando fibras inteligentes multifuncionales a partir de biomateriales, residuos industriales, polímeros técnicos, nanotecnología y biotecnología, aunadas a procesos integrados con sistemas de IA. Algunos ejemplos de las fibras inteligentes desarrolladas y en desarrollo se muestran en la Figura 2. Fibras a partir de biopolímeros de almidón que tiene inteligencia múltiple, las cuales involucran el soporte, transporte y liberación de nutrientes para remediación de suelos, son

biodegradables y favorecen la retención de humedad del suelo. Fibras con inteligencia antimicrobianas a base de PET reciclado. Fibras inteligentes a partir de residuos textiles con capacidad de funcionar como micro-reactores o soporte de catalizadores para la obtención de biocombustibles.

Fibras inteligentes ultraporosas para el almacenamiento de gases como hidrógeno o dióxido de carbono. Fibras y/o filamentos a base de polímeros de alto valor agregado incorporados con nanotubos de carbono para su uso en baterías flexibles y/o impresión 3D. Estos son solo algunos ejemplos de los aportes que han permitido al grupo de investigación ser parte de los pioneros en el desarrollo de materiales inteligentes en forma de fibra de nueva generación.

### **Conclusiones**

En este documento se presenta una forma de relacionar, de manera análoga, diferentes perspectivas de inteligencia psicológica con materiales inteligentes en forma de fibra. Se realiza una reseña de diferentes capacidades que puede tener una fibra inteligente en respuesta a un estímulo externo. Se construye un tejido sencillo que refleja algunas tendencias y campos de investigación sobre el desarrollo de fibras y textiles inteligentes.

Las fibras, hilos y textiles representan una de las necesidades básicas en la vida diaria de los seres humanos. Las fibras y textiles inteligentes, son materiales que están tejiendo el futuro. Es crucial un mayor conocimiento y aprovechamiento de estos materiales futuristas, ya que la sociedad se ve desafiada para hilar nuevas estrategias que satisfagan las necesidades del hoy y del mañana.

Que en el telar de la ciencia y la sostenibilidad, para la construcción de investigación, se integren diversas textiles que favorezcan el desarrollo disciplinas tecnológicas y el hilo de la integral del planeta.

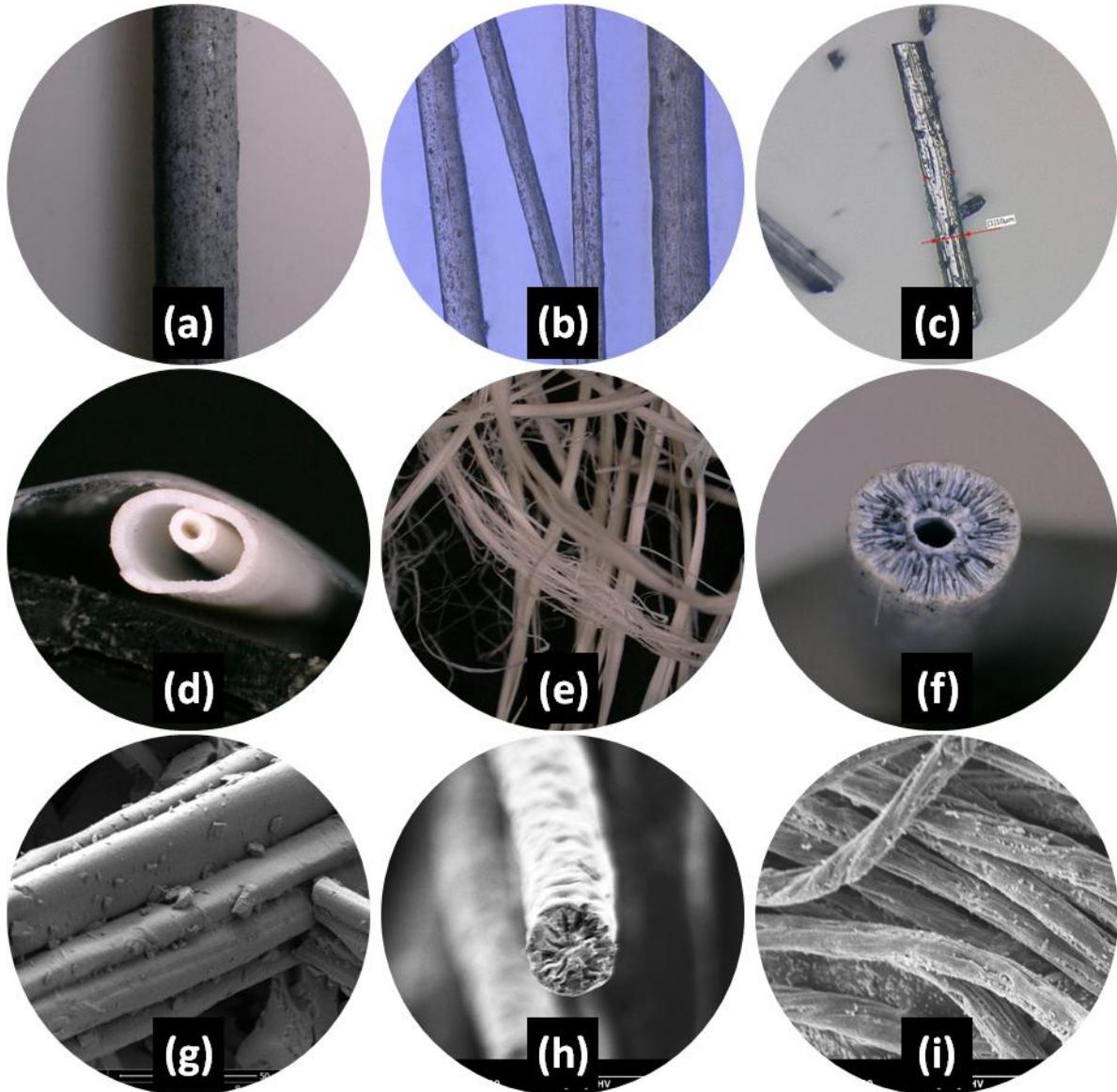


Figura 2: Fibras inteligentes. (a) fibra química con carga de nanofibras de carbón, fibra con inteligencia conductora; (b) fibra con inteligencia saludable, contiene nanopartículas antivirales y antimicrobianas; (c) fibra de carbono para soporte de catalizadores h alerogéneos; (d) fibra inteligente multicapa; (e) fibra biodegradable con inteligencia sustentable, (f) fibra con inteligencia ultraporosa y conductora; (g) fibra con inteligencia para remoción de contaminantes del agua; (h) fibra con inteligencia ultraporosa para almacenamiento de gases; (i) fibra con inteligencia para liberación de nutrientes en suelos agrícolas.

## Referencias

- [1] Dang T. y Zhao M., The application of smart fibers and smart textiles, *J. Phy.: Conf. Serv.*, 1790, 2021.
- [2] Giannuzzi R., Primiceri V., Scarfiello R., Pugliese M., Mariano F., Maggiore A., Prontera C.T., Carallo S., De Vito C., Carbone L. y Maiorano V., Photochromic Textiles based upon aqueous blends of oxygen-deficient WO<sub>3-x</sub> and TiO<sub>2</sub>

- nanocrystals, *Textiles*, 2, pp. 382-394, 2022.
- [3] Jinlian H., Kumar B. y Lu J., *Handbook of Fibrous Materials. En: Fundamentals of the Fibrous Materials*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Alemania, 2020, pp. 1-36.
- [4] Jinlian H., Kumar B. y Lu J., *Handbook of Fibrous Materials. En: Smart Fibers*, Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, Alemania, 2020, pp. 361-390.
- [5] Manaia J.P., Cerejo F. y Duarte J., Revolutionising textile manufacturing: a comprehensive review on 3D and 4D printing technologies, *Fash Tex*, 20, 2023.
- [6] Ornaghi H.L., Motta R., Monticeli F.M. y Agnol L.D., Smart Fabric Textiles: Recent Advances and Challenges, *Textiles*. 2, pp. 582-605, 2022.



**Microorganismos:  
Biofábricas productoras de  
energía**

**Dr. Enrique Salgado Hernández  
Dr. Sergio Martínez Hernández  
Dr. Angel Isauro Ortiz Ceballos**  
Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada  
(INBIOTECA)  
Universidad Veracruzana

**Abstract**

The microorganisms, from their ability to decompose organic matter to their capacity to transform it into various biofuels, could be defined as veritable "microscopic factories" generating bioenergy. They are important for replacing fossil-based compounds with bio-based chemicals and fuels that are crucial for the implementation of a sustainable bioeconomy.

**Keywords:** biofuels, biomass, organic matter, energy

**Resumen**

Los microorganismos, desde su capacidad de descomponer la materia orgánica, hasta su capacidad para transformarla en diversos biocombustibles, pueden ser considerados como auténticas "fábricas microscópicas" generadoras de bioenergía. Estos son importantes para remplazar los compuestos de origen fósil por productos químicos y combustibles de origen biológico cruciales para la implementación de una bioeconomía sostenible.

**Palabras clave:** biocombustibles, biomasa, materia orgánica, energía

**Introducción**

Los microorganismos que viven en diversos hábitats producen de forma natural una gran variedad de compuestos bioactivos que son usados para producir combustibles, fármacos y otros químicos importantes. El ser humano, a lo largo de la historia ha venido aprovechando las capacidades de los microorganismos para su propio beneficio. Por ejemplo, la fermentación mediante la acción microbiana fue utilizada desde hace miles de años por civilizaciones ancestrales para la producción de alimentos y bebidas fermentadas,

como el etanol. En la mayoría de los casos, los microorganismos procedían del medio ambiente y el papel que desempeñaban en la fermentación era desconocido. Louis Pasteur (1857), a través de varios experimentos demostró que la fermentación era producto de la actividad de microorganismos vivos; después, se desarrolló el uso de cultivos puros (un solo tipo de bacteria o levadura) que permitió un mayor control del proceso de fermentación (Buchholz and Collins, 2013). Estos descubrimientos establecieron las bases de la fermentación industrial y la generación de los primeros biocombustibles, como el bioetanol. En la década de 1860, Nikolaus August Otto fue el primero en utilizar el bioetanol en el transporte; cuatro décadas después, el Dr. Rudolf Diesel patentó el motor de encendido por compresión que utilizaba aceite de cacahuate como combustible. Este reemplazó a las máquinas de vapor, hasta que en la década de 1920 cuando los fabricantes de motores diésel se pasaron al gasóleo, un producto abundante, barato y menos viscoso. Además, se desarrollaron sistemas de inyección de combustible cada vez más sofisticados para hacer funcionar estos aceites derivados de combustibles fósiles.

Pronto los combustibles fósiles desplazaron al bioetanol como combustible. Sin embargo, el uso de combustibles fósiles ha aumentado con el tiempo, lo que ha provocado varias catástrofes de contaminación atmosférica. El incremento de los precios de los combustibles fósiles se acentuó considerablemente a principios del tercer milenio, y los biocombustibles empezaron a adquirir popularidad como consecuencia de la creciente concienciación mundial sobre la contaminación y el calentamiento

global, así como del deseo de autosuficiencia (Zabermawi y col. 2022). Por ello, no es de sorprenderse que los microorganismos resurjan como unos fieles aliados en la búsqueda de nuevas fuentes de energía más sostenibles. Los microbios son ingenieros diminutos que desempeñan un papel crucial en el reciclaje y el mantenimiento de la vida en la Tierra. Estos microorganismos producen, acumulan y secretan moléculas biológicamente activas como azúcares, lípidos, aminoácidos y fitohormonas que mantienen la viabilidad del suelo y el crecimiento de las plantas. Así, podemos aprovechar su potencial como verdaderas "Biofábricas microscópicas" en la producción de combustibles de nueva generación; bioetanol, biodiésel y biometano (Kumar y col. 2018).

### **Primero que todo, ¿qué es la energía?**

La energía, es la capacidad de realizar un trabajo y se obtiene de diferentes fuentes; por ejemplo, la luz solar, el viento, el agua, la energía nuclear y los combustibles fósiles.

Los combustibles fósiles son ahora nuestra principal fuente de energía y contribuyen con el 78.9% del consumo de energía primaria (REN21, 2023). Los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) se consideran una fuente de energía no renovable, ya que no pueden regenerarse y eventualmente se acabarán. Además, la combustión, una reacción química en la que un combustible se combina con el oxígeno, genera agua y dióxido de carbono ( $CO_2$ ); un gas de efecto invernadero.

Existen otras fuentes de energía conocidas como energías renovables que se obtienen a partir de

fuentes naturales que se regeneran rápidamente. Las energías renovables representan el 12.6% del consumo de energía primaria (REN21, 2023). Las fuentes de energía renovables (biomasa, solar, eólica, geotérmica e hidroeléctrica) que utilizan recursos autóctonos tienen el potencial de proporcionar servicios energéticos con emisiones cero o casi cero de contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero (Goldemberg, 2021).

La biomasa es la materia orgánica de los seres vivos, sus excretas y sus restos no vivos, que se puede convertir en energía, denominada bioenergía. La bioenergía, es la energía que se obtiene tras la combustión de un biocombustible. Un biocombustible se define como combustible derivado directa o indirectamente de la biomasa. El uso de bioenergía no contribuye al aumento de los gases de efecto invernadero, dado que el balance global de las emisiones de  $CO_2$  a la atmósfera es neutro. En contraste, el uso de combustibles fósiles liberan carbono a la atmósfera; carbono que ha estado fijo a la Tierra desde hace millones de años y no forma parte del ciclo de carbono (Figura 1).

### **¿De dónde proviene la bioenergía?**

La bioenergía puede ser producida a partir de diferentes tipos de biomasa como árboles, cultivos agrícolas, residuos vegetales, residuos de animales y muchos otros materiales biológicos. La formación de biomasa se produce a partir de la energía solar, por lo tanto, los biocombustibles es energía proveniente de la luz solar (Figura 2); esto es, mediante la fotosíntesis, las plantas transforman el  $CO_2$  del aire y el agua (sin valor energético) en materia orgánica con alto contenido energético.

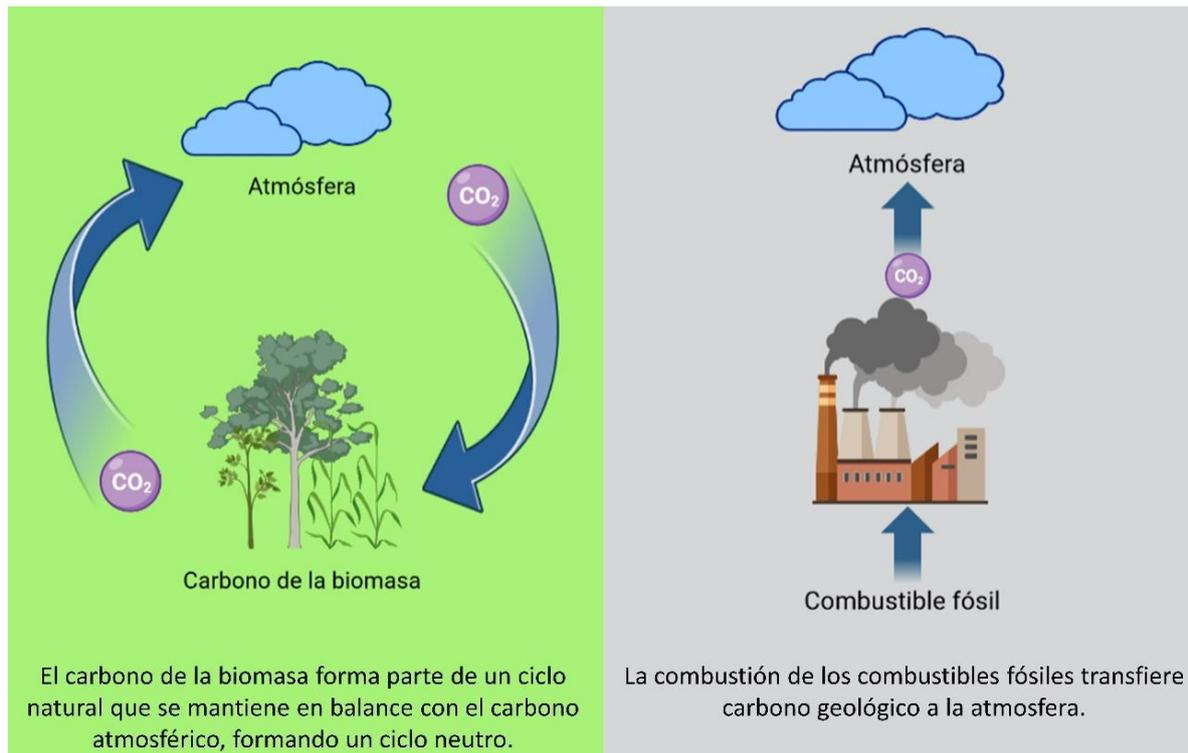


Figura 1: Ciclo neutro del carbono de la biomasa vs carbono transferido de las reservas geológicas.

La materia orgánica se compone de carbono, hidrógeno, oxígeno y en menor cantidad de nitrógeno y azufre (Kindberg, 2010) que al combinarse se forman moléculas complejas esenciales para la vida; proteínas, carbohidratos, lípidos y ácidos nucleicos. Así, la biomasa almacena la energía en los enlaces químicos, conocida como energía química que se encuentra en los enlaces de los elementos que conforman la materia orgánica. Esta energía se puede liberar mediante la combustión. La energía liberada se utiliza para calentar agua, generar electricidad o impulsar motores, entre otros.

Existen diversas formas de convertir la biomasa en bioenergía. Sin embargo, en este artículo se destaca la conversión bioquímica mediada por la acción de microorganismos. La fermentación es un ejemplo clásico de la conversión bioquímica natural que usa bacterias, levaduras y otros microorganismos para producir azúcares y almidones de

cultivos (por ejemplo, la caña de azúcar y otros granos) en etanol (Zabermawi y col. 2022).

### Una biofábrica microscópica

Cuando se habla de fábrica microscópica nos referimos a los microorganismos conocidos como “microbios”, organismos que no podemos ver a simple vista. Éstos pueden ser: bacterias, arqueas, protozoos, plantas microscópicas y hongos, que incluye a las levaduras. Todos ellos son unicelulares, es decir, que a diferencia de los seres humanos que tienen billones de células, ellos tienen solo una célula.

En su visualización más simple, una célula, ya sea un organismo unicelular o una célula de un organismo pluricelular, es una bolsa delimitada por una membrana, que contiene una solución acuosa en la que se encuentran todas las moléculas y estructuras necesarias para permitir su supervivencia continua. Dependiendo

del microbio, puede haber otras estructuras, por ejemplo, una pared celular que proporcione protección o soporte adicional, o un flagelo, una cola flexible, que proporcione movilidad en el entorno circundante. La supervivencia requiere el crecimiento celular, la replicación de su material genético y,

a continuación, la división, que suele repartir el contenido en dos células hijas iguales. En condiciones ideales de entorno y suministro de alimentos, la división de algunas bacterias puede producirse cada 20 minutos, mientras que mayoría tarda más.

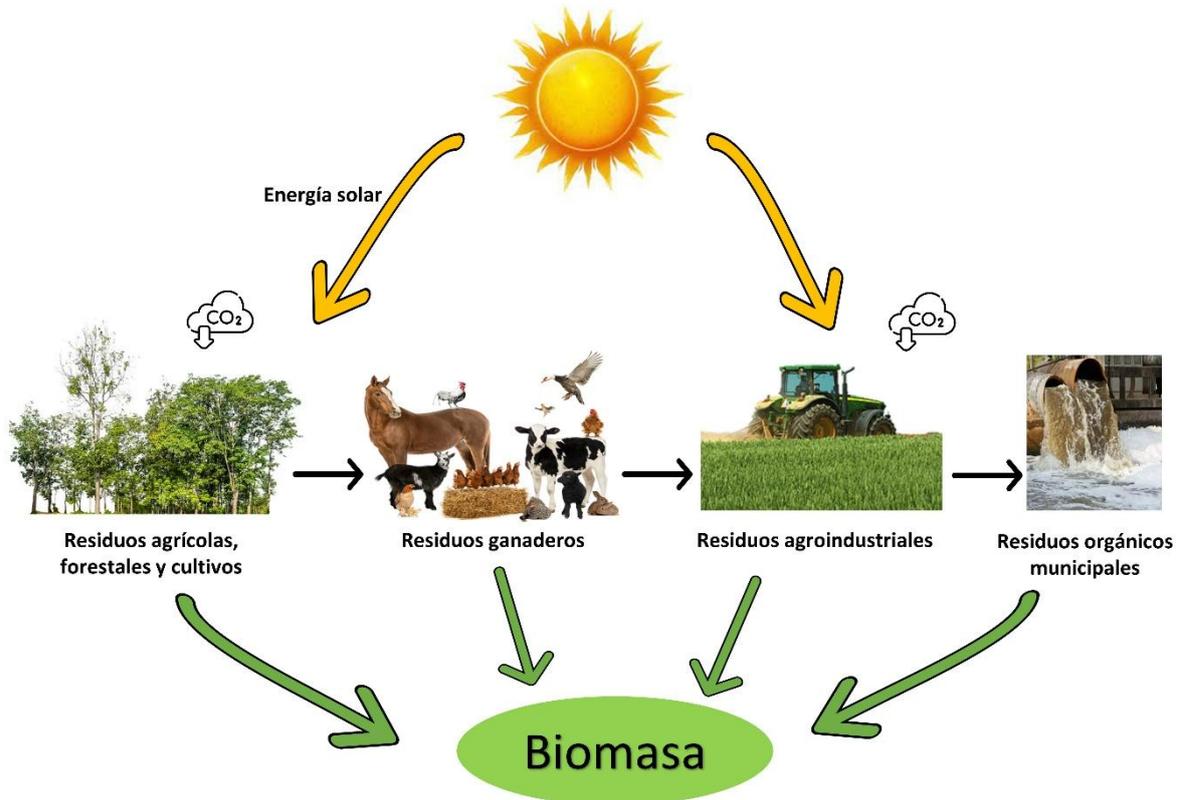


Figura 2: Formación de la fuente de biomasa para generar biocombustibles con el uso de microorganismos.

Los microorganismos, como todos los seres vivos requieren de energía para llevar a cabo todos sus procesos celulares. Esta energía la pueden obtener al alimentarse de compuestos orgánicos que pueden ser un carbohidrato, un lípido o, una proteína. Los compuestos orgánicos actúan como la “materia prima” de estas microfábricas. Dado que todas las moléculas biológicas contienen el elemento carbono, es necesario disponer de una fuente alimentaria de carbono.

Por lo tanto, los alimentos ingeridos son, como mínimo, una fuente de energía y carbono, cuya forma química se reorganiza al pasar por varias rutas denominadas vías metabólicas. Cada vía metabólica es como una cadena de montaje que realiza una serie de tareas específicas para transformar la materia prima en un producto final. En otras palabras, la forma química de las moléculas de la materia prima se reorganiza para producir todas las sustancias químicas necesarias

para el crecimiento, tras la adición o eliminación de otros elementos como hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre.

Como se mencionó, es necesario que la materia prima (alimento) entre a la célula microbiana que actúa como una “biofábrica” a nivel microscópico (Figura 3). En cada vía metabólica hay pequeños ayudantes llamados “enzimas”, que son como “obrerros” que hacen que la materia prima se transforme más rápido y fácilmente. Prácticamente su trabajo es acelerar o facilitar diferentes reacciones químicas en los organismos, sin ellas algunos

procesos llevarían mucho tiempo o incluso no sucederían. Sin embargo, cuando algunos compuestos de la materia prima son de gran tamaño deben ser transformada a compuestos más simples o de menor tamaño. Para esto algunos microorganismos secretan enzimas (enzimas extracelulares) que descomponen los compuestos complejos en otros más simples que puedan entrar a la célula microbiana. A medida que la materia prima se transforma, se generan productos finales o metabolitos que la célula excreta al medio externo o los almacena en su interior. Algunos de estos productos pueden ser de interés comercial, como los biocombustibles.

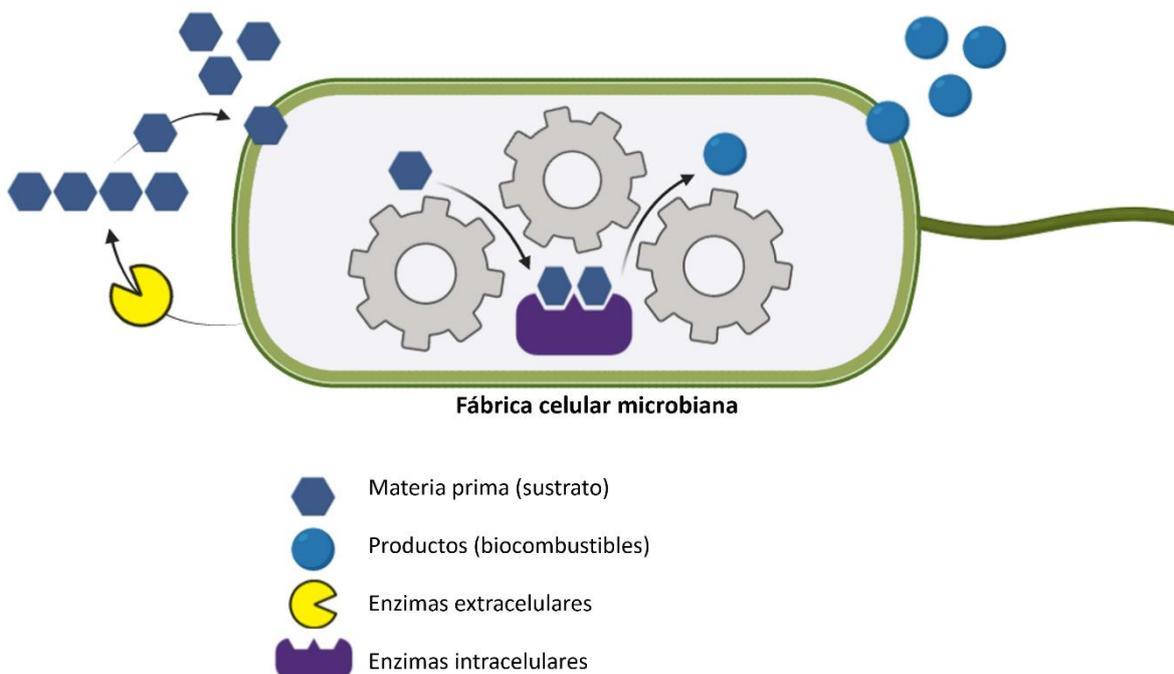


Figura 3: La célula microbiana como una fábrica microscópica.

Los microorganismos pueden cambiar o elegir rutas metabólicas dependiendo de su entorno y recursos disponibles. Esta versatilidad les permite adaptarse a diferentes entornos y aprovechar una variedad de fuentes de nutrientes para su crecimiento y supervivencia. Por lo tanto, pueden alimentarse de la materia

orgánica proveniente de diferentes procesos catalogados como residuos. Por ejemplo, residuos de plantas, animales y municipales, como las aguas residuales. Del mismo modo, si un compuesto considerado contaminante puede entrar en una vía metabólica, entonces puede convertirse en "materia prima" para

estas microfábricas. Gracias a estas características, los microorganismos pueden llevar a cabo la degradación una amplia gama de contaminantes (Evans and Furlong, 2011).

### Biocombustibles microbianos

En la producción de biocombustibles se usan biorreactores, dispositivos donde se cultivan los microorganismos y se extraen sus productos finales (Figura 4); por ejemplo, moléculas combustibles, incluyendo aquellas utilizadas en el transporte y la generación de electricidad. La capacidad de producir ciertos productos o biocombustibles depende del tipo de microorganismo, su acceso a alimentos y su capacidad para procesarlos. Toda esta información o instrucciones están guardadas en el ácido desoxirribonucleico (ADN), que puede ser una estructura circular en

bacterias o lineal y estar dividida en cromosomas en animales y plantas. Las bacterias también tienen pequeñas piezas de ADN llamadas plásmidos, que son importantes en biotecnología ambiental porque pueden contener genes útiles para el humano. Los plásmidos pueden transferirse entre bacterias, permitiendo que la capacidad de procesar ciertos materiales se comparta fácilmente. Las bacterias son muy buenas para intercambiar su ADN (Evans and Furlong, 2011). Estas características les permiten a los microorganismos ocupar diversos nichos ecológicos, es decir, desempeñar diferentes funciones fundamentales en los ecosistemas y su aplicación en la biotecnología; por ejemplo, en la remoción de cierto contaminante y en la producción de un biocombustible específico.

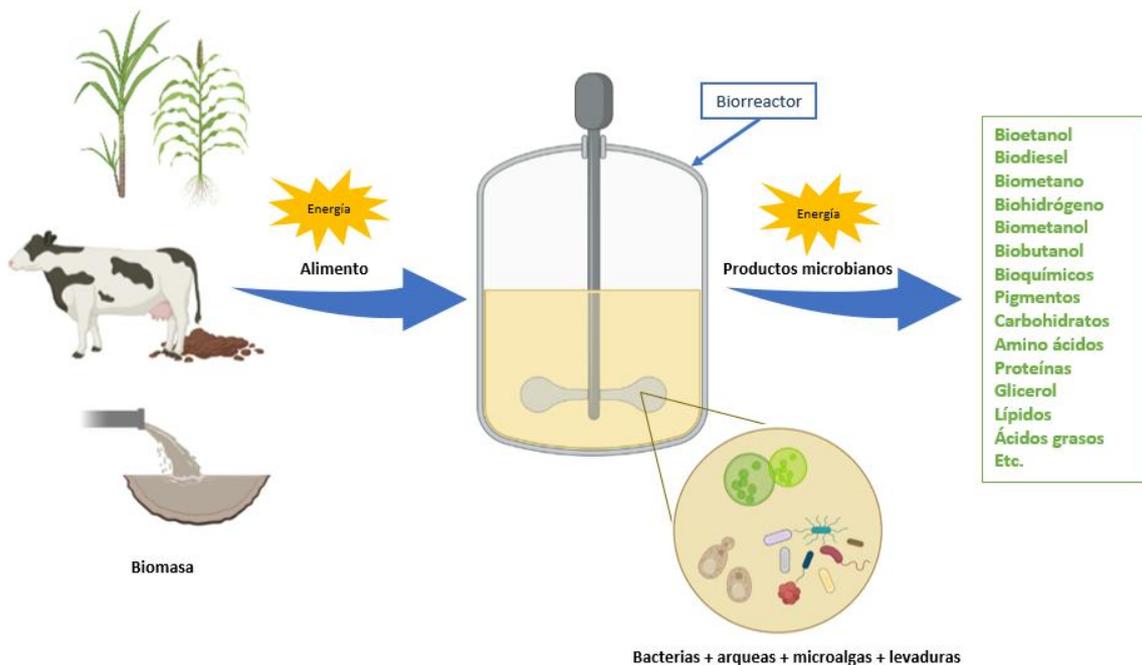


Figura 4: Esquema general de la producción de biocombustibles microbianos.

Algunos microorganismos, como las levaduras, son excelentes fermentadores que se han utilizado durante mucho tiempo para producir etanol a partir de biomasa. Por otro lado, microorganismos como las cianobacterias tienen la capacidad de acumular grandes cantidades de lípidos, útiles en la producción de biodiésel. Además, los microorganismos pueden liberar gases, como el hidrógeno, que podría ser una alternativa valiosa a los combustibles gaseosos convencionales como el gas natural. También, diversos microbios pueden utilizarse como pilas de combustible para producir electricidad, útiles para el desarrollo de baterías. Los electrones se producen durante la oxidación microbiana de diversos sustratos, que luego se transfieren a otros electrodos para producir electricidad (Kumar y col. 2018).

### **Avances recientes**

Actualmente, la producción de biocombustibles mediante la bioconversión microbiana de la materia prima orgánica puede mejorarse mediante manipulaciones genéticas y metabólicas de los microorganismos. Anteriormente, las cepas microbianas para usos industriales se mejoraban a través de métodos de selección y mutagénesis aleatoria; sin embargo, son procesos poco controlados, lentos e impredecibles (Majidian y col. 2018). Algunos microorganismos pueden producir biocombustibles de forma natural, a menudo crecen lentamente, no soportan eficientemente sustancias tóxicas de los biocombustibles y no pueden usar completamente toda la biomasa. Por ejemplo, muchos no pueden usar la xilosa, un tipo de azúcar que conforma alrededor del 30% de las plantas. Usando técnicas avanzadas en biología e ingeniería, se logra que microorganismos como

*Escherichia coli* y *Saccharomyces cerevisiae*, produzcan combustibles a partir de todos los tipos de azúcares de las plantas. Estos microorganismos han sido utilizados en grandes fábricas por muchos años y se pueden modificar para que toleren sustancias tóxicas de biocombustibles y usen diferentes fuentes de carbono (Zhang *et al.* 2011). Por ejemplo, la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, genera el etanol a través de una vía metabólica más corta comparada con la bacteria *Escherichia coli*, que usa una vía más larga. Pero gracias a la ingeniería metabólica es posible modificar estas vías para hacer que los microorganismos produzcan un biocombustible de forma más eficiente. También, se ha logrado que microbios que normalmente no producen ciertos biocombustibles lo hagan, al introducir el material genético o enzimas necesarios de microorganismos que sí los producen; es decir, la ingeniería genética nos ayuda a crear microorganismos que pueden usar diferentes materias primas para producir biocombustibles (Kumar and Kumar, 2017).

### **Conclusiones**

Los microorganismos se presentan como aliados valiosos en la búsqueda de fuentes de energía sostenibles, demostrando ser "fábricas microscópicas" capaces de transformar la biomasa en biocombustibles. Actualmente, las investigaciones científicas se centran en mejoras genéticas y metabólicas para optimizar la producción de biocombustibles y superar las limitaciones naturales de algunos microorganismos. En última instancia, la investigación y aplicación de microorganismos en la producción de biocombustibles representan una esperanzadora y prometedor ruta hacia la obtención de energía sostenible, contribuyendo a reducir la dependencia

de los combustibles fósiles y mitigar los impactos ambientales asociados. Sin embargo, la principal dificultad en la producción de biocombustibles a través de "fábricas microbianas radica en lograr generar una considerable cantidad de combustible con un costo más bajo y una eficiencia superior a los combustibles fósiles tradicionales.

## Referencias

- [1] Buchholz, K. y Collins, J., The roots—a short history of industrial microbiology and biotechnology, *Applied microbiology and biotechnology*, [97], pp. 3747-3762, 2013.
- [2] Evans, G. G. y Furlong, J. *Environmental biotechnology: theory and application*. John Wiley & Sons. 2011, pp. 13-30.
- [3] Goldemberg, J., World energy assessment. Energy and the challenge of sustainability, United Nations, New York, 2001, pp. 14.
- [4] Kindberg, L. y Energy, N. F., An introduction to bioenergy: feedstocks, processes and products, *ATTRA*, pp. 1-12, 2010.
- [5] Kumar, A., Kaushal, S., Saraf, S. A. y Singh, J. S., Microbial bio-fuels: a solution to carbon emissions and energy crisis, *Frontiers in Bioscience-Landmark*, 23 [10], pp. 1789-1802, 2018.
- [6] Kumar, R. y Kumar, P., Future microbial applications for bioenergy production: a perspective, *Frontiers in microbiology*, 450 [8], pp. 1-4. 2017.
- [7] Majidian, P., Tabatabaei, M., Zeinolabedini, M., Naghshbandi, M. P. y Chisti, Y., Metabolic engineering of microorganisms for biofuel production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [82], pp. 3863-3885, 2018.
- [8] REN21. Renewables 2023 Global Status Report. 2023. Consultado en enero 2024: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023\\_GlobalOverview\\_Full\\_Report\\_with\\_endnotes\\_web.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023_GlobalOverview_Full_Report_with_endnotes_web.pdf)
- [9] Zabermawi, N. M., Alsulaimany, F. A., El-Saadony, M. T. y El-Tarabily, K. A., New eco-friendly trends to produce biofuel and bioenergy from microorganisms: An updated review, *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2022.

**Nanoacarreadores:  
Novedoso enfoque en la lucha  
contra la enfermedad de  
chagas**



**Dra. Berenice Prestegui Martel**  
**Dra. Bertha Espinoza Gutiérrez**  
Laboratorio de estudios sobre tripanosomiasis y  
Leishmaniasis  
Instituto de Investigaciones Biomédicas  
Universidad Nacional Autónoma de México

**Abstract**

Chagas disease is a little known disease, transmitted by a parasite named *Trypanosoma cruzi*. In 2005, the World Health Organization declared it a neglected disease, which contributed to spreading knowledge about the characteristics of the disease, as well as supporting scientific research into new and better treatments, early diagnosis, detection and care of people with the disease. In the field of scientific research, particles smaller than viruses are being studied, in order to efficiently carry already tested drugs; but also with the application of this nanotechnology, to the use of nanocarriers that manage to reach the parasite and modify its way of reproduction or infection, thus fighting the disease.

**Keywords:** Chagas disease, nanoparticles, virus-like particles, *Trypanosoma cruzi*.

**Palabras clave:** Enfermedad de Chagas, nanopartículas, partículas tipo viral, *Trypanosoma cruzi*.

**Conociendo la Enfermedad de Chagas y el causante de ella.**

La enfermedad de Chagas es causada por el parásito intracelular *Trypanosoma cruzi*, y transmitida principalmente por el vector hematófago de la subfamilia *Triatominae*, otras vías de transmisión son: a través de transfusiones sanguíneas provenientes de personas infectadas, por vía congénita, es decir, cuando una madre infectada lo transmite a su bebé durante la gestación, y por vía oral. La enfermedad y el parásito fueron descritos por el médico brasileño Carlos Justiniano Ribeiro das Chagas en el año 1909.

El ciclo de vida del parásito está

constituido por una fase de replicación dentro del sistema digestivo del insecto vector (epimastigote), el insecto al alimentarse de la sangre del huésped, expulsa al parásito en sus heces (tripomastigote, fase infectiva), muy cerca de la zona en la que se alimenta. Cuando el huésped siente comezón, debido al piquete del insecto, este suele rascar la zona y producir una diminuta entrada hacia los vasos sanguíneos del huésped, dejando así, una vía de entrada al parásito. Así, *T. cruzi* invade las células para iniciar una fase de replicación (amastigote) e infección de los tejidos del hospedador.

Por años, la terapia farmacológica se ha basado en dos fármacos principalmente, el benznidazol (Bz) y el nifurtimox (Nfx). Ambos tienen marcadas desventajas, tales como: baja eficacia en la tasa de muerte del parásito en su fase intracelular, múltiples y graves efectos adversos. Estos últimos son la causa que genera el abandono del tratamiento por parte de los pacientes. El Bz, es el fármaco de primera línea para el tratamiento de la enfermedad de Chagas, que de acuerdo con el Sistema de Clasificación Biofarmacéutica (Biopharmaceutical Classification System) es un fármaco con baja solubilidad y baja permeabilidad, lo que significa baja penetración en los tejidos afectados, por lo tanto baja capacidad para combatir al parásito. Cuando el fármaco es biotransformado en el hígado del huésped, se generan metabolitos tóxicos que pueden provocar vómitos, dolor abdominal, hepatitis y neuropatías, entre otros efectos adversos (Muraca y col., 2020). En el caso de Nfx, este se ha usado desde los últimos 40 años, y en 1970 fue aprobado para el tratamiento de la enfermedad en pacientes adultos y pediátricos de países de Latinoamérica, sin embargo,

para los pacientes pediátricos no se tienen bien claros los regímenes de dosificación. En el estudio realizado por Stass y col. se determinó que las dosis administradas a pacientes pediátricos (menores de 18 años y con peso corporal mayor a 2.5) no dejan un efecto benéfico claro para ellos, pues las dosificaciones se basan en las dosis para adultos pero ajustadas al peso de los pacientes pediátricos, esto dificulta valorar la eficacia del fármaco así como sus efectos adversos (Stass y col, 2022).

Estas características ponen de manifiesto la necesidad de realizar investigación enfocada en buscar nuevos blancos terapéuticos, diseñar y sintetizar nuevos fármacos o probar otros ya conocidos. Una novedosa forma de abordar estas investigaciones es el uso de nanotecnología. En este contexto, surge la nanomedicina, la cual se definió en 2005 como la aplicación de la nanotecnología

en la resolución de problemas de salud, que resulta en disminución de costos de desarrollo de nuevos fármacos. El término se refiere al uso de tecnología que implica manipular materiales de tamaño nanométrico ( $1 \text{ nm} = 0.000000001 \text{ m}$ ) (Figura 1); los cuáles tienen blancos terapéuticos que son componentes celulares, como: proteínas, ácidos nucleicos, aquí se incluyen al ácido desoxirribonucleico (ADN) y al ácido ribonucleico (ARN). Estos materiales se usan para curar enfermedades, corregir la expresión de una proteína, o eliminar virus y bacterias que causan enfermedades. Sus propiedades físicas, químicas o biológicas les proveen la ventaja de ser controladas en un laboratorio, lo que les otorga estabilidad y mayor tiempo de vida media, les permite dirigirse hacia células específicas y aumentar su eficacia (Pautler y Brenner, 2010; Britto y col., 2022).

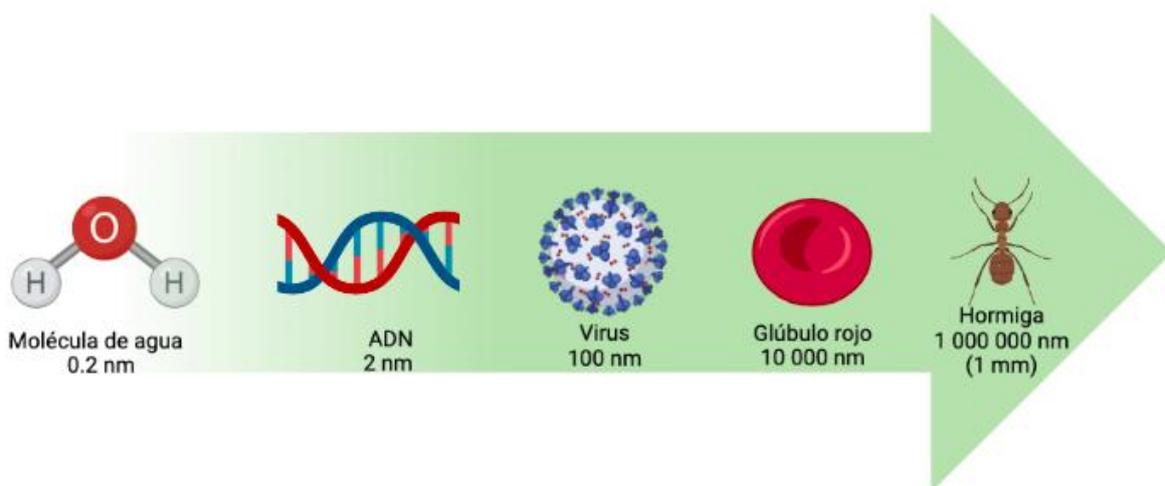


Figura 1: Comparación de tamaños en escala de nanómetros, de diferentes estructuras. El tamaño de un nanomaterial comprende entre 1 y 100 nm. Created with BioRender.com

El ADN es el centro de control que contiene la información para construir fragmentos de RNA mensajero, y a

partir de este, construir aminoácidos correctamente leídos para producir miles de proteínas capaces de realizar

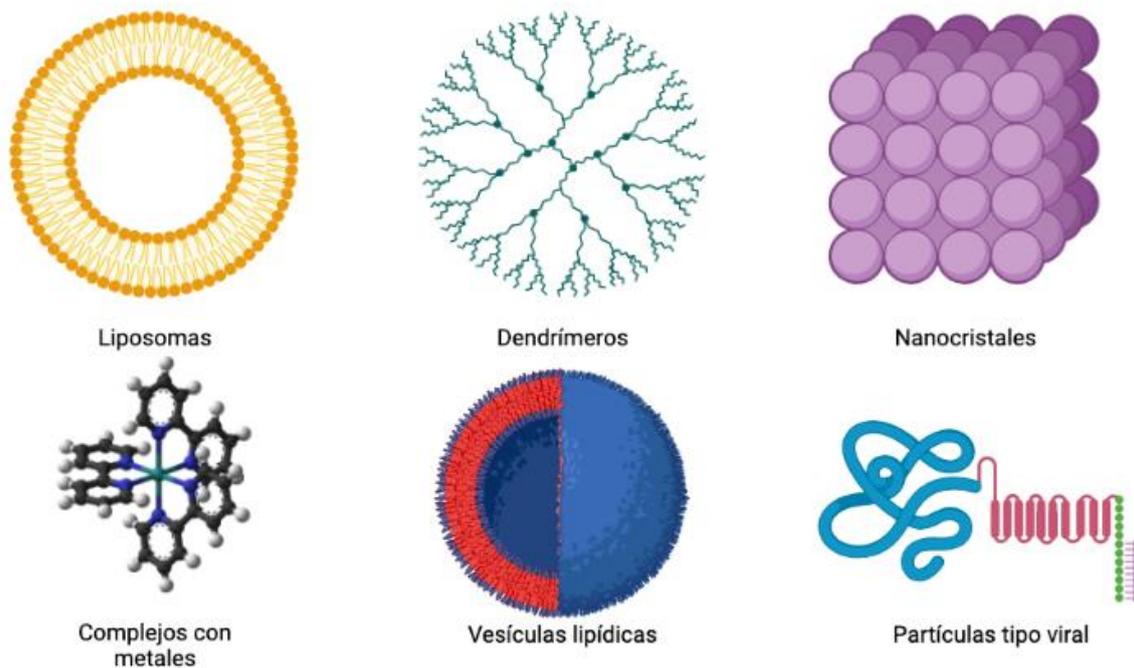
funciones específicas dentro de la célula. 2010).

En el humano, muchas enfermedades aparecen debido a alteraciones en cualquiera de estas moléculas. En otros organismos, como en bacterias y protozoarios, las proteínas son importantes para poder infectar, crecer y replicarse dentro de un huésped, causando así enfermedades.

Las nanopartículas pueden resolver problemas como: aumentar la disolución en agua de fármacos poco hidrosolubles, evitar la degradación enzimática, dirigir el fármaco a células específicas disminuyendo así, los efectos adversos y aumentando la eficacia del fármaco, entre otros (Pautler y Brenner,

Los materiales mas usados en el campo de la nanomedicina son las nanopartículas, que pueden ser: dendrímeros, liposomas, vesículas lipídicas, nanocrisales, complejos con metales, complejos nanométricos de ciclodextrinas y más recientemente, las partículas tipo viral. Figura 2.

Se han diseñado gran variedad de sistemas de tamaño nanométrico, empleando diversidad de materiales. Aquí nos enfocaremos en el uso de nanopartículas para mejorar el tratamiento de la enfermedad de Chagas.



Created in BioRender.com 

Figura 2: Representación de algunos nanomateriales de interés en medicina. Las nanopartículas tienen diversidad en su origen químico, forma y tamaño, lo que permite ampliar las posibilidades de combinación con fármacos o ser acarreadores de ácidos nucleicos. Created with BioRender.com

**Dendrimeros** Los dendrimeros son macromoléculas nanoestructuradas ramificadas, con forma globular y múltiples cargas, positivas o negativas, que le confieren la capacidad de transportar fármacos de naturaleza variable. Estas nanoestructuras, mejoran las propiedades farmacocinéticas, aumentan la solubilidad en agua, protegen al fármaco de la degradación cuando circulan en sangre y mejoran su paso a través de las membranas biológicas. Se han diseñado estructuras de dendrimeros con fármacos parecidos a los denominados triazoles, como el fluconazol (fármaco usado en infecciones causadas por hongos) pero con fines de actividad contra *T. cruzi*. En estos estudios se encontró que el uso de dendrimeros muestra actividad antiproliferativa y alta actividad contra epimastigotes de *T. cruzi* in vitro (Juárez y col., 2019).

### **Liposomas**

Los liposomas son estructuras construidas por lípidos y sus derivados, que tienen la característica de transportar fármacos hidrofílicos como lipofílicos. Son sistemas biodegradables, compatibles con la naturaleza celular y tienen la ventaja de poder modificar su superficie, para poder identificar un blanco terapéutico específico. Bz en estructuras de liposomas ha sido probado, y se ha observado mayor cantidad de Bz en hígado cuando va en liposoma comparado con su forma libre (Morilla y Romero, 2015).

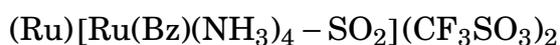
### **Nanocristales**

El Bz es una molécula hidrofóbica, es decir, no se disuelve en agua. Algunos grupos de investigación se enfocan en diseñar nanocristales de Bz, que son estructuras de Bz combinadas con un polímero biocompatible (Bz-nps), que mejora la solubilidad del fármaco, en

agua. Además, han encontrado que estas nanopartículas no causan la hemólisis de glóbulos rojos (eritrocitos), lo cual disminuiría la toxicidad en modelos en animales; también, se ha observado inhibición del amastigote de *T. cruzi* en cardiomiocitos en cultivo (Scalise y col., 2016).

### **Complejos con metales**

Respecto al área de metales de coordinación se han reportado complejos de Bz con rutenio



que proporcionan mayor solubilidad en agua a dicho fármaco y disminuye la toxicidad en cultivos de células. Un hallazgo interesante fue encontrar reducción de la carga parasitaria en experimentos in vitro y con animales (Silva y col., 2010).

### **Partículas tipo viral**

El trabajo de la Dra Bertha Espinoza Gutiérrez, en el Laboratorio de estudios sobre Tripanosomiasis y Leishmaniasis, del Instituto de Investigaciones Biomédicas, UNAM ha resultado en el diseño de nanopartículas transportadoras de ácidos nucleicos, que constituye un avance biotecnológico en la búsqueda de dirigir de manera específica un fármaco, en este caso un oligonucleótido antisentido (OAS), hacia el parásito.

Los avances en este campo se centran en el estudio de proteínas importantes para la sobrevivencia e infección del parásito. Sabemos que para que una proteína sea fabricada por una célula, un ARN mensajero (mARN) debe ser sintetizado en el núcleo y transportado hacia el citoplasma, posteriormente es conducido hacia las estructuras intracelulares denominadas ribosomas, lugar donde se crean nuevas proteínas

que realizan actividades vitales para el parásito. La estrategia tiene como objetivo bloquear el paso de estos mRNA, mediante el uso de OAS que se unen de manera complementaria al

mRNA, evitando que sea transportado al ribosoma y que sea sintetizado, deteniendo así, la función de proteínas clave (Figura 3).

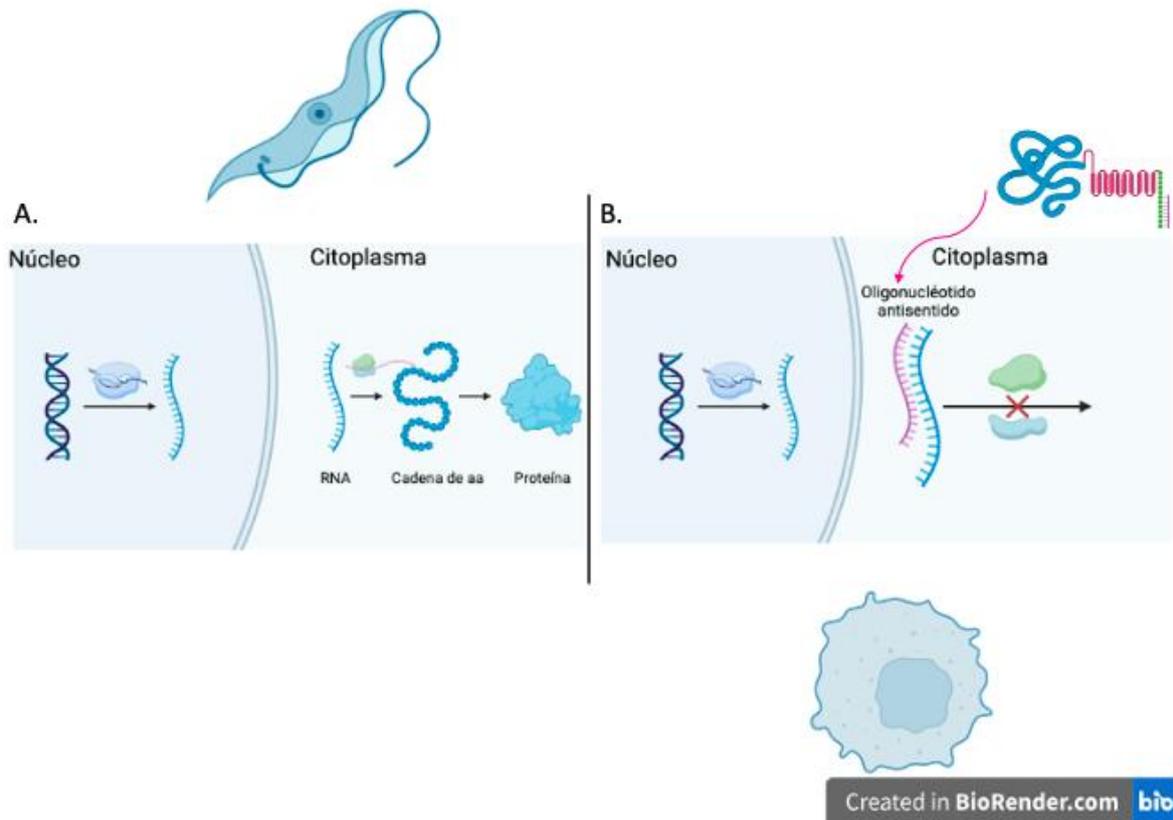


Figura 3: Bloqueo de la síntesis de proteínas a través de OAS. A) Esquema de la síntesis de una proteína a partir de su RNA. B) Mecanismo de bloqueo del RNA por medio de un OAS para evitar la síntesis de proteína. Created with BioRender.com

Debido a que estas estructuras de OAS, son sensibles a la degradación por enzimas localizadas en el citoplasma del parásito, se han buscado formulaciones que protejan al OAS de esta degradación, pero que además, lo entreguen y liberen de manera eficiente dentro del parásito de *T. cruzi*. Existen grupos de investigación que centran sus recursos en el diseño de Partículas Tipo Viral (Virus Like Particle, VLP por sus siglas en inglés) que transporten un mRNA. Las VLP tienen diferentes estructuras, hablaremos de las formadas por una nanoestructura

denominada tribloque. El grupo de investigación, en colaboración con el grupo del Dr. Hernández del Instituto de Química de la UNAM diseñó esta nanopartícula artificial denominada C-S10-K12, en la Figura 4 podemos observar la partícula compuesta por tres partes. La parte 1 se refiere a un polipéptido en espiral de 400 aminoácidos que le da estabilidad a la nanopartícula; la parte 2, es la columna central y está formada por 10 cadenas rígidas de proteína similar a la seda; finalmente, la parte 3, es una serie de lisinas (K12) que

sirven de unión al mRNA. Con este diseño, se han realizado estudios de estabilidad y de transfección en cultivos celulares; aunque se ha encontrado baja eficiencia en la capacidad de la nanopartícula para atravesar la membrana de células de mamífero, el

diseño permite la protección del mRNA mensajero dentro de la estructura de la nanopartícula pues han visto que se encapsula, quedando dentro de ella, a diferencia de otros lipocomplejos donde el mRNA queda fuera, exponiéndolo a la degradación (Jekhmane y col., 2017).

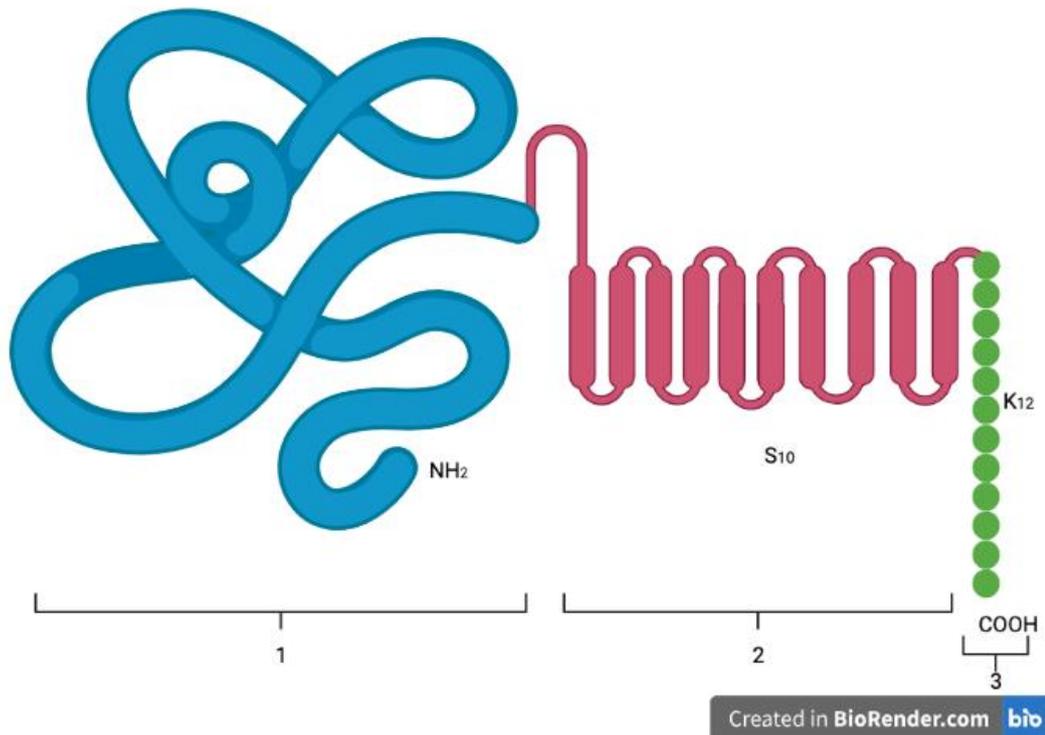


Figura 4: Estructura de nanopartículas tipo viral que acarrean OAS. Created with BioRender.com

Un paso importante en la ruta que siguen estas nanopartículas en la nanomedicina, fue el dado por el grupo de investigadores dirigidos por la Dra Bertha Espinoza, pues en sus experimentos demostraron la eficacia de bloqueo de un mRNA dirigido hacia un receptor de membrana del parásito, este quedó evidenciado porque se encontró una cantidad de mRNA menor cuando se expusieron los parásitos a la nanopartícula comparado con parásitos que no fueron expuestos a la nanopartícula (Cárdenas y col., 2020). Aún queda mucho por desarrollar, como por ejemplo agregar moléculas en la

nanopartícula que las dirijan a blancos específicos, agregar facilitadores de la entrada de las nanopartículas al parásito. Hay un trabajo intenso detrás de esta compleja nanotecnología, y este tipo de trabajo se está haciendo en varios laboratorios de la UNAM.

#### Agradecimientos

BPM agradece al Programa de Becas Posdoctorales de la SECIHTI. BPM agradece a Kevin Axel Prestegui Ramos por el apoyo en la conceptualización de este manuscrito.

## Referencias

- [1] Britto Hurtado, R., Cortez Valadez, M., & Flores Acosta, M. (2022). Aplicaciones tecnológicas de las nanopartículas en la medicina e industria. *Epistemus*, 16(33).
- [2] Cárdenas-Guerra, R. E., Moreno-Gutierrez, D. S., Vargas-Dorantes, O. J., Espinoza, B., & Hernandez-Garcia, A. (2020). Delivery of antisense DNA into pathogenic parasite *Trypanosoma cruzi* using virus-like protein-based nanoparticles. *Nucleic acid therapeutics*, 30(6), 392–401.
- [3] Jekhmane, S., de Haas, R., Paulino da Silva Filho, O., van Asbeck, A. H., Favretto, M. E., Hernandez Garcia, A., Brock, R., & de Vries, R. (2017). Virus-like particles of mRNA with artificial minimal coat proteins: particle formation, stability, and transfection efficiency. *Nucleic acid therapeutics*, 27(3), 159–167.
- [4] Juárez-Chávez, L., Pina-Canseco, S., Soto-Castro, D., Santillan, R., Magaña-Vergara, N. E., Salazar-Schettino, P. M., Cabrera-Bravo, M., & Pérez-Campos, E. (2019). In vitro activity of steroidal dendrimers on *Trypanosoma cruzi* epimastigote form with PAMAM dendrons modified by click chemistry. *Bioorganic chemistry*, 86, 452–458.
- [5] Morilla, M. J., Romero, E. L. (2015). Nanomedicines against Chagas disease: an update on therapeutics, prophylaxis and diagnosis. *Nanomedicine*, 10(3), 465–481.
- [6] Muraca GS, Talevi A, Pesce GO. (2020). Enfermedad de Chagas: novedades en naomedicinas como estrategia terapéutica. *Ciencia Reguladora*, Abr (6): 32-37.
- [7] Pautler, M., & Brenner, S. (2010). Nanomedicine: promises and challenges for the future of public health. *International journal of nanomedicine*, 5, 803–809.
- [8] Scalise ML, Arrúa EC, Rial MS, Esteva MI, Salomon CJ, Fichera LE. (2016). Promising efficacy of benznidazole nanoparticles in acute *Trypanosoma cruzi* murine model: In-vitro and in-vivo studies. *Am J Trop Med Hyg*, Aug 1;95(2):388–393.
- [9] Silva, J. J., Guedes, P. M., Zottis, A., Balliano, T. L., Nascimento Silva, F. O., França Lopes, L. G., Ellena, J., Oliva, G., Andricopulo, A. D., Franco, D. W., & Silva, J. S. (2010). Novel ruthenium complexes as potential drugs for Chagas's disease: enzyme inhibition and in vitro/in vivo trypanocidal activity. *British journal of pharmacology*, 160(2), 260–269.
- [10] Stass, H., Ince, I., Grossmann, U., Weimann, B., & Willmann, S. (2022). Nifurtimox for treatment of chagas disease in pediatric patients: the challenges of applying pharmacokinetic-pharmacodynamic principles to dose finding. *The AAPS journal*, 24(5), 92.

# Relaciones tóxicas: obesidad e inflamación



M.C. Citlali Figueroa Guzmán  
Dra. Lorena Martínez Alcantar  
Dr. Jesús Campos García

Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas  
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

## Abstract

The environment that surrounds us is full of threats of all kinds: bacteria, viruses, injuries or traumas, and even the food we eat daily, if it is not adequate, could become a threat. The good news is that the body is prepared for any arbitrariness that may arise and our inflammation is one of the main responses of the body when facing some type of damage. The inflammatory process is made up of a series of highly complex events, so its delimitation in space and time, intensity and duration is very important, since inflammation that is not controlled in intensity and duration can cause collateral damage to neighboring tissues.

Being considered an inflammatory disease, obesity is the result of an imbalance in energy consumption, despite the fact that this type of inflammation is not like the one we normally know, since it does not show visible signs, that does not mean that it is not a threat just as important as others, since there is a constant state of release of pro-inflammatory factors the body remains on alert, even though we are not aware of it.

**Keywords:** inflammation, disease, obesity-food.

## Resumen

El ambiente que nos rodea se encuentra lleno de amenazas de todo tipo: bacterias, virus, lesiones o traumatismos, e incluso los alimentos que ingerimos diariamente, si no son los adecuados, podrían llegar a ser una amenaza. La buena noticia es que nuestro cuerpo se encuentra preparado para cualquier arbitrariedad que pueda presentarse y la inflamación es una de las principales respuestas del cuerpo al enfrentarse a algún tipo de daño. El proceso inflamatorio está constituido

por una serie de eventos sumamente complejos, por lo que es muy importante su delimitación en espacio y tiempo, intensidad y duración, ya que una inflamación no controlada en intensidad y duración puede provocar daños colaterales en los tejidos vecinos sanos.

La obesidad es el resultado de un desbalance en el consumo de energía, siendo considerada una enfermedad inflamatoria; a pesar de que este tipo de inflamación no sea como el que conocemos normalmente, ya que no muestra signos visibles, eso no significa que no sea una amenaza igual de importante que otras, ya que al existir un estado constante de liberación de factores pro inflamatorios el cuerpo se mantiene en alerta, aunque no estemos conscientes de ello.

**Palabras clave:** inflamación, enfermedad, obesidad-alimentos

## Había una vez... la inflamación

Seguramente, al escuchar la palabra “inflamación”, venga a la mente aquel momento en el que nos golpeamos un dedo y en pocos minutos después del dolor que nos causa, se torna de color rojizo aumentando su tamaño. Puedes imaginar entonces, que, si las señales externas en el cuerpo son visibles, en el interior ocurren un gran número de eventos celulares y moleculares en los cuales, cada célula o molécula participante tiene una función específica, estos eventos necesarios para eliminar el daño y restaurar los tejidos a su condición original deben trabajar en conjunto de manera sistemática y jerárquica.

Debido a los “malestares” que nos produce la inflamación, ésta tiene mala fama, pero en realidad la respuesta inflamatoria tiene el propósito fisiológico de mantener un

ambiente estable en nuestro cuerpo y aunque resulte molesta y dolorosa, es un proceso imprescindible, dinámico, complejo y sistémico (García-Casal & Pons-García, 2014).

El proceso inflamatorio es una reacción imprevista ante una agresión, que incluye decisiones de puesta en marcha o de cese basadas en la integración de una secuencia de moléculas generadas en respuesta al daño, el reclutamiento, instrucción y activación de células y como toda buena película o novela, esta respuesta tiene un inicio, un desarrollo y un desenlace. En las primeras dos etapas ocurre una secuencia coordinada de eventos complejos y altamente modulados por la producción de diversas sustancias químicas (llamadas de forma general “mediadores” de la inflamación) producidas tanto por células infiltradas (macrófagos, neutrófilos, linfocitos) como por células residentes del tejido infectado o lesionado. El desenlace de la respuesta inflamatoria corresponde a la etapa de **resolución**, durante esta etapa ocurre el regreso a la homeostasis mediante el cese de todos los eventos anteriormente mencionados, sin embargo, al ser este un evento de paro no debe ser considerado un evento pasivo durante el cual la inflamación simplemente desaparece. En su lugar, se produce una cascada de procesos estrictamente regulados. En primer lugar, los agentes nocivos que desencadenaron la respuesta inflamatoria se eliminan, posteriormente se suspende la síntesis de mediadores inflamatorios y los mediadores que permanecen en el tejido se desintegran, lo que detiene el reclutamiento adicional de células y formación del edema. A continuación, las células inmunológicas se eliminan mediante apoptosis (muerte celular programada). La etapa de resolución es punto clave para que

el tejido se recupere, cicatrice y eventualmente recupere su función, si esta etapa se ve alterada, la respuesta inflamatoria se prolonga ya que al no haber instrucciones de cese, siguen generándose mediadores y estos a su vez reclutan y facilitan el ingreso de células del sistema inmune (neutrófilos, macrófagos, linfocitos), las cuales secretan más sustancias que activan a otras células, generando de esta forma un “círculo vicioso” que está en continua retroalimentación perpetuando y extendiendo el daño (Feghali & Wright 1997).

Dependiendo del tiempo de evolución, la inflamación puede ser aguda o crónica: la inflamación **aguda**, es de breve duración (horas-días) y su objetivo principal es eliminar el agente nocivo y crear resiliencia.

Por otra parte, la inflamación **crónica**, se conoce como inflamación lenta a largo plazo que dura períodos prolongados (meses a años), generalmente se genera a partir de una deficiente etapa de resolución. En general, la extensión y los efectos de la inflamación crónica varían según la causa de la lesión y la capacidad del cuerpo para reparar y superar el daño. La inflamación que se extiende a nivel espacial o temporal se torna crónica y puede a largo plazo dañar algunos órganos y desencadenar otras enfermedades (Artemniak-Wojtowicz).

### **Células del sistema inmunológico: Soldados responsables de la respuesta inflamatoria.**

En lo que respecta a la salud y la inmunidad, podemos pensar en nuestros cuerpos, como naciones independientes y en el sistema inmunológico como la fuerza militar de esa nación; el cuerpo lucha constantemente por mantener una homeostasis pacífica contra numerosos

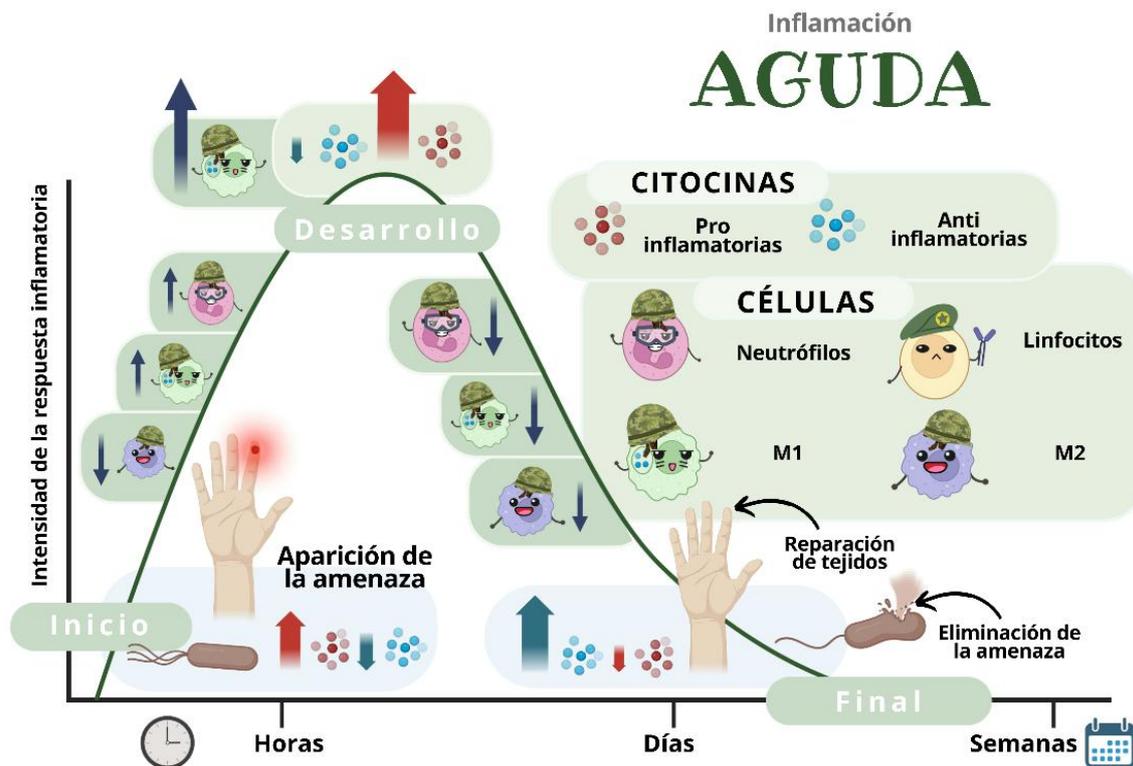


Figura 1: Inflamación aguda.

invasores potenciales en múltiples frentes. Con cada elemento que se toca, se respira o se come, el cuerpo está expuesto a tropas enemigas en forma de bacterias, virus y parásitos. Los órganos, las células y las vías del sistema inmunitario conforman una intrincada red de tipo militar que protege al huésped de la invasión y declara la guerra a las infecciones, siendo la respuesta inflamatoria una de las principales estrategias y primeras líneas de defensa que utilizan.

Cuando se presenta un daño en algún tejido de la “nación” las células epiteliales y endoteliales dañadas liberan diversas alertas químicas (llamadas citocinas) que atraen en primera instancia soldados de infantería, los cuales se transportan a través de la sangre. Esta línea de defensa está conformada por

neutrófilos y macrófagos, las cuales montan ataques rápidos, pero no específicos, contra cualquier invasor que encuentren a su paso.

Los **neutrófilos** son mediadores clave de la respuesta inflamatoria que se encuentran viajando en el torrente sanguíneo y, una vez que llegan al sitio del daño pueden participar en el reclutamiento de más soldados o bien en la activación de comandantes o generales del ejército inmunológico (linfocitos T y B) que empleen estrategias más sofisticadas para contener la invasión. Por su parte los **macrófagos** son soldados despiadados que se comen a sus enemigos (proceso denominado fagocitosis), por lo que su actividad es fundamental en el inicio, mantenimiento y resolución de la inflamación.

Durante el proceso de inflamación, los macrófagos modulan su participación en la guerra mediante la producción de citocinas y factores de crecimiento. Para llevar a cabo esta modulación existen distintas tropas de macrófagos que desempeñan funciones distintas. Los **macrófagos M1**, son las células que participan activamente en los eventos de eliminación de microorganismos o células dañadas. Durante su período más agresivo los M1 también solicitan apoyo de los linfocitos para lograr una eliminación más eficaz. Durante la eliminación del agente nocivo, estas células secretan diversas citocinas, que en conjunto reciben el nombre de **citocinas pro-inflamatorias**, las cuales promueven e intensifican la inflamación.

Por otra parte, la tropa de **macrófagos M2**, son células más pacíficas cuya finalidad es generar un ambiente totalmente opuesto a los M1 (**anti-inflamatorio**) a través de las citocinas que secretan, lo que permita que poco a poco todos los participantes activos de la respuesta inflamatoria se detengan, protegiendo así a los tejidos circundantes de procesos inflamatorios prolongados o de respuestas inflamatorias agresivas. La participación de estas células M2 induce los procesos de cicatrización, reparación, remodelación y regeneración celular, que eventualmente permite que los tejidos regresen a ser normales y funcionales (Zaldívar, 2002).

### **Citocinas: ¿heroínas o villanas?**

La guerra entre los soldados del sistema inmune y la amenaza comienza con la liberación de las alertas químicas llamadas citocinas, sin ellas no se podría avisar de la existencia de un enemigo, ni podría haber comunicación

entre los distintos “soldados” del ejército inmunológico. Por otra parte, un exceso en la producción y liberación de estos mensajes moleculares puede provocar un desequilibrio que lleva a un constante estado de alerta que resulta dañino para el cuerpo.

Es ahora que surge la duda de: Si las citocinas promueven la inflamación, y pueden generar un daño a largo plazo... ¿son heroínas o villanas? Recordemos entonces, que la inflamación tiene como principal propósito devolver la homeostasis al cuerpo eliminando la amenaza, el problema es cuando esta inflamación se torna crónica resultando de un **desequilibrio en las citocinas pro-inflamatorias y anti-inflamatorias**. Por otro lado, no podemos clasificar a unas como buenas y a otras como malas ya que ambas cumplen una función específica y son esenciales para la correcta resolución durante un episodio de invasión-guerra en el cuerpo (Feghali & Wright 1997).

Al inicio de la defensa contra una infección es necesaria en mayor parte la participación de las citocinas pro inflamatorias controlada a su vez por las anti-inflamatorias. En condiciones normales estas moléculas limitan el daño de la reacción inflamatoria (a lo que se le conoce como acción **inmunomoduladora**) en condiciones patológicas la acción de las citocinas anti inflamatoria es insuficiente para contrarrestar el efecto de la inflamación, pero si persisten, pueden causar daños a largo plazo.

### **Dieta alta en grasas: una amenaza inflamatoria**

En la actualidad, la obesidad y el sobrepeso son un problema creciente de salud pública que afecta a personas sin discriminar sexo o edad.

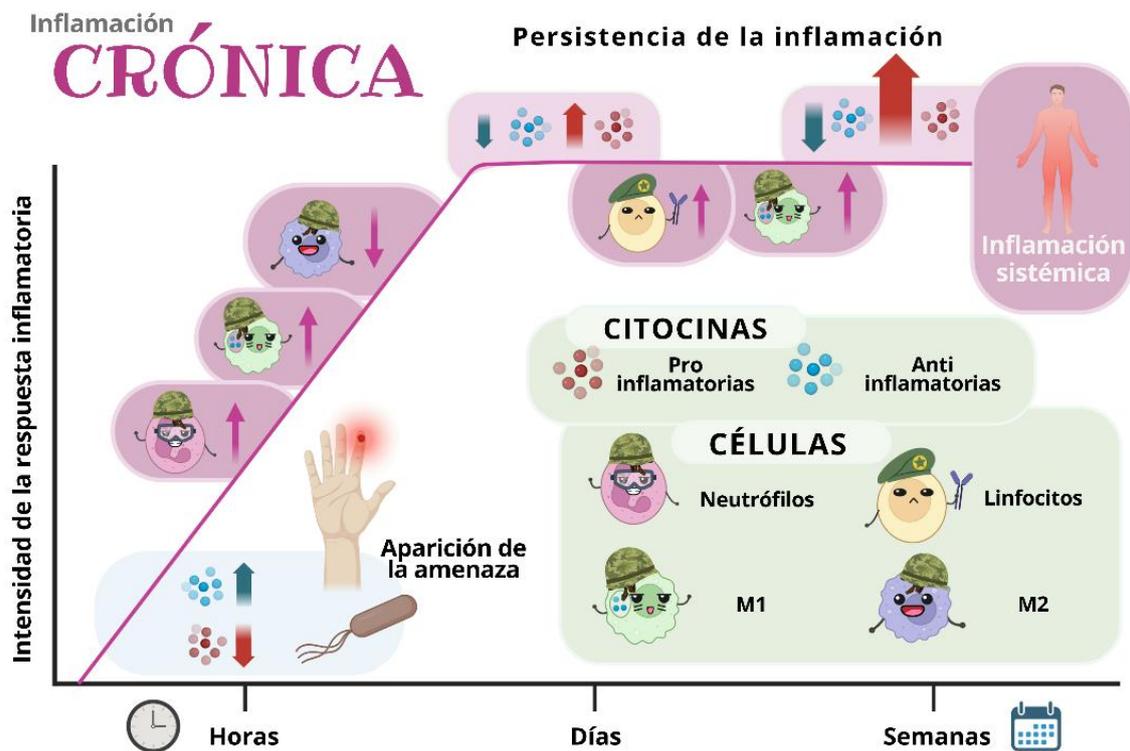


Figura 2: Inflamación crónica.

Más allá de modificar la apariencia del individuo, la obesidad y sobre peso son factores de riesgo para el desarrollo de muchas enfermedades crónicas, por lo que son consideradas enfermedades y no sólo meras cuestiones estéticas.

Es conocido que la inflamación puede ser generada por agentes externos, pero ¿alguna vez has pensado que los alimentos que consumimos también son agentes externos que pueden llegar a ser una amenaza al equilibrio en los procesos del cuerpo?; específicamente nos referimos a los alimentos altos en grasa o azúcares cuyo consumo contribuye a sobrepasar nuestra capacidad de gasto de energía.

Cuando el consumo de energía que obtenemos a través de la dieta sobrepasa al gasto energético se le conoce como “**balance energético**

**positivo**” es decir, el consumo de calorías de los alimentos consumidos diariamente es mayor que el gasto de energía que realizamos en nuestra rutina diaria o ejercicio. Permanecer en este estado de balance energético positivo durante un periodo de tiempo considerable puede llevarnos a desarrollar enfermedades como la obesidad y el sobrepeso, ambas patologías son consideradas como estados de **inflamación crónica de bajo grado** (una inflamación prolongada en el tiempo que no presenta signos visibles: no hay hinchazón ni enrojecimiento, pero el sistema inmune está alerta) también conocida como inflamación metabólica o meta inflamación.

Todo comienza en el adipocito (célula especializada del tejido adiposo), quien se encarga de almacenar el exceso

de energía que ingerimos a través de nuestros alimentos. El tejido adiposo es como una gran empresa, donde los adipocitos son los obreros y, su trabajo cotidiano es almacenar energía, una dieta rica en grasas provoca que el adipocito tenga más trabajo del normal, almacenando más y más energía, llegando al punto de tanto estrés, que puede llegar a quedarse sin oxígeno, causando incluso su propia muerte; es entonces que se suscita un caos en el entorno. Pero... ¿Qué sucede entonces?, se liberan citocinas pro-inflamatorias para llamar a los soldados del sistema inmune. Los primeros en llegar son los macrófagos, específicamente los de la armada M1, quienes promueven aún más la producción de citocinas pro-inflamatorias. Aunque este tipo de inflamación es menor que la causada por infección, daño o cáncer, cuando se produce un aumento de citocinas en las fronteras locales, estas se diseminan y se distribuyen a través del torrente sanguíneo provocando una activación celular generalizada que se le conoce como **inflamación sistémica**.

Además de la inflamación sistémica la actividad de los macrófagos M1 genera desequilibrios metabólicos como la resistencia a la insulina. Los macrófagos son actores centrales del tejido adiposo, corresponden a poco más del 40% de la célula de este tejido. El tejido adiposo de forma normal contiene abundantes células inmunitarias, como eosinófilos, linfocitos T (Th2 y T reguladores) y macrófagos M2 (todos de características antiinflamatorias). Se sabe que estas células secretan citocinas antiinflamatorias (como IL-10, IL-4, IL-13 e IL-33) para mantener la homeostasis del tejido adiposo y controlar la sensibilidad a la insulina; por lo que estas moléculas son esenciales para mantener un ambiente saludable en el tejido

adiposo. Por otro lado, durante la obesidad, el tejido adiposo se caracteriza por la infiltración de varias células inmunitarias como monocitos, neutrófilos, linfocitos (Th1 y Th17) y macrófagos M1 (proinflamatorios). El aumento de la secreción de ácidos grasos libres en la obesidad activa los macrófagos y adipocitos residentes que conducen a la secreción de citocinas proinflamatorias (como TNF- $\alpha$ , IL-6, IL-1 $\beta$ ). Este proceso impulsará el reclutamiento de monocitos y la diferenciación de macrófagos M1 en el tejido adiposo. Adicionalmente, la activación de otras vías de señalización celular induce alteraciones metabólicas conocido como **síndrome metabólico**, siendo la más documentada hasta el momento la inhibición del receptor de insulina, lo que conlleva a la aparición de resistencia a la insulina, componente clave en la etiología de la Diabetes Mellitus tipo 2 (Izaola *et al.*, 2015).

Existen individuos obesos que no presentan signos de inflamación, a lo que se le podría conocer como “obesos metabólicamente sanos”, aunque los expertos consideran que solo son una transición al estado de enfermedad. Es así como la inflamación sale de la idea común del dedo hinchado y rojo, ya que incluso podríamos estar en un estado inflamatorio sin saberlo.

Por otra parte, el “**balance energético negativo**” es el gasto de energía mayor al consumo de alimentos, lo cual nos permite permanecer en un estado saludable; en este contexto, el adipocito continúa realizando su función normal de almacén de energía en un entorno favorable. Se sabe que los macrófagos que forman parte de las poblaciones celulares dentro de este tejido son los de la armada M2 y ellos previenen el desarrollo de la inflamación.

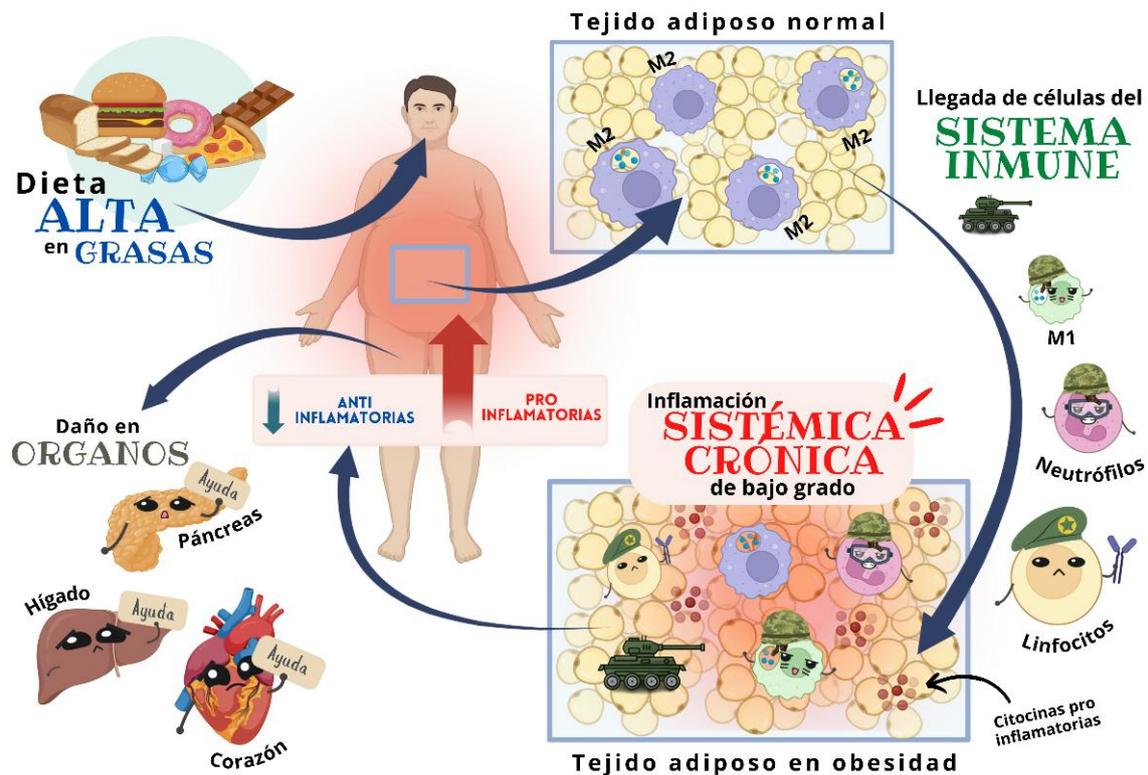


Figura 3: Dieta alta en grasa

Como podemos notar, la dieta influye poderosamente en el estado de inflamación de nuestro organismo. Así, una alimentación rica en grasas saturadas y azúcar abundante en productos ultraprocesados y muy energéticos, se considera una dieta proinflamatoria. Además de los eventos antes mencionados, diversos estudios han demostrado que las dietas ricas en estos alimentos promueven la inflamación sistémica a través del desequilibrio entre las poblaciones de microorganismos benéficos que habitan en nuestro intestino.

La producción excesiva de moléculas oxidantes llamadas de forma genérica ROS (especies reactivas de oxígeno) son también otro mecanismo por medio del cual estos alimentos hipercalóricos (alto contenido de calorías) y ultraprocesados favorecen

el desarrollo y establecimiento de la inflamación (Blancas-Flores *et al.*, 2010).

La nutrición está considerada entonces, como un factor medio-ambiental modificable a largo plazo, es decir a través de la nutrición se puede prevenir o favorecer el desarrollo de obesidad o de sus complicaciones asociadas. Afortunadamente, ¡nunca es tarde para cambiar!, ya que podemos realizar modificaciones en nuestro estilo de vida que nos ayuden a controlar el sobrepeso y por ende la inflamación metabólica, manteniendo así un estado más saludable (García-Casal & Pons-García, 2014).

Las investigaciones sugieren que la alteración o modulación de la respuesta inmunológica a través de la dieta puede ser útil para prevenir o para tratar

una amplia variedad de patologías. Como si se tratara de una receta mágica, en la actualidad circulan un sin número de dietas antiinflamatorias que prometen ser la solución a todos nuestros problemas de salud, y es cuando las leemos que recordamos los consejos de nuestras abuelas y madres ¡come frutas y verduras! ¡prefiere siempre alimentos integrales! ¡toma té y no comas alimentos procesados! Recomendaciones obtenidas del conocimiento empírico que debíamos tomar muy en cuenta.

Conocimiento que actualmente tiene suficiente evidencia que apoya que alimentos como las nueces, soya, alimentos de colores diferentes de origen vegetal, pescado, té y cafeína están relacionados con la disminución de los marcadores de inflamación. Las dietas hipocalóricas (bajo consumo de calorías) también se han asociado a una disminución de niveles de las moléculas relacionadas con la inflamación, ya que al ocurrir pérdida de peso y disminución de tejido adiposo disminuyen las señales inflamatorias y la secreción de citocinas (Amati *et al.*, 2010)

La creciente evidencia científica y médica ha revelado que la inflamación y la obesidad están inexplicablemente entrelazados. La inflamación crónica de bajo grado asociado a la obesidad y sus múltiples repercusiones sistémicas se caracterizan por la producción aumentada de citocinas proinflamatorias. Ahora tenemos una comprensión mucho más profunda de las sofisticadas interacciones entre macrófagos y adipocitos durante la obesidad; por lo que este progreso revela varios avances que pueden aprovecharse en el tratamiento para suprimir o modular la respuesta inflamatoria del tejido adiposo y tratar la obesidad y las complicaciones

relacionadas a esta (Ellulu *et al.*, 2017).

## Referencias

- [1] Amati, L., Marzulli, G., Martulli, M., Chiloiro, M., & Jirillo, E. (2010). Effects of a hypocaloric diet on obesity biomarkers: prevention of low-grade inflammation since childhood. *Current pharmaceutical design*, 16(7), 893-897.
- [2] Artemniak-Wojtowicz, D., Kucharska, A., & Pyrzak, B. (2020). Obesity and chronic inflammation crosslinking. *Central European Journal of Immunology*, 45(4), 461-468. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC33658893/>
- [3] Blancas-Flores, G., Almanza-Pérez, J. C., López-Roa, R. I., Alarcón-Aguilar, F. J., García-Macedo, R., & Cruz, M. (2010). La obesidad como un proceso inflamatorio. *Boletín médico del Hospital Infantil de México*, 67(2), 88-97. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-11462010000200002](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-11462010000200002)
- [4] Ellulu, M. S., Patimah, I., Khaza'ai, H., Rahmat, A., Abed, Y. (2017). Obesity and inflammation: the linking mechanism and the complications. *Archives of medical science*, 13(4), 851-863. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5507106/>
- [5] Feghali, C. A., Wright, T. M. (1997). Cytokines in acute and chronic inflammation. *Front Biosci*, 2(1), d12-d26. [https://www.researchgate.net/publication/14059816\\_Cytokines\\_acute\\_and\\_chronic\\_inflammation](https://www.researchgate.net/publication/14059816_Cytokines_acute_and_chronic_inflammation)

- [6] García-Casal, M. N., Pons-Garcia, H. E. (2014, June). Dieta e inflamación. In *Anales Venezolanos de Nutrición* (Vol. 27, No. 1, pp. 47-56). Fundación Bengoa. <https://www.analesdenutricion.org.ve/ediciones/2014/1/art-9/>
- [7] Izaola, O., Luis, D. D., Sajoux, I., Domingo, J. C., Vidal, M. (2015). Inflamación y obesidad (lipoinflamación). *Nutricion hospitalaria*, 31(6), 2352-2358. [https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0212-16112015000600003](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112015000600003)
- [8] Zaldívar Ochoa, M. (2002). El sistema inmunológico de las mucosas. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 18(5), 352-354. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-21252002000500012](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21252002000500012)



**Utilización de desechos  
municipales y lixiviados para  
generación de electricidad a  
partir de celdas microbianas**

**Dra. Gladis Guadalupe Suarez Velázquez**  
Universidad Politécnica de Altamira

**Dr. Francisco Manuel García Reyes**

**Dr. Luis Alberto García Reyes**

**C.P. Rubén Francisco Turriza González**

Instituto Tecnológico Nacional de México

Campus Cd. Madero

## Abstract

This work presents a review of the characteristics of microbial fuel cells known as MFC. Such as its topology, operation, materials, and electrical parameters of interest. A focus on the use of municipal wastewater in MFC developed in the last 5 years is shown. This work focuses on the comparison of energy generation based on the combination of materials used in the reported works.

**Keywords:** bacteria, microbial fuel cell, municipal waste.

## Resumen

En este trabajo se presentan una revisión sobre las características de las celdas de combustible microbianas conocidas como CCM. Tales como su topología, funcionamiento, materiales y parámetros eléctricos de interés. Se muestra un enfoque sobre el uso de aguas residuales municipales en CCM desarrolladas en los últimos 5 años. Con un enfoque en la comparación de la generación de energía en base a la combinación de los materiales utilizados en los trabajos reportados.

**Palabras clave:** bacterias, celda de combustible microbiana, residuos municipales.

## Introducción

Con el agotamiento de los combustibles fósiles, diversas alternativas han sido propuestas para la generación de energía verde. Además del interés en la reducción de desechos por medio de reciclaje o valorización y disminución de la contaminación.

Se estima que a nivel mundial los desechos municipales superan los 2 millones de toneladas anuales, previendo que en el 2050 esta

cifra alcanzará los 3400 billones. La composición de los desechos municipales generalmente consiste en los residuos domésticos, los cuales son enviados por lo general a tiraderos municipales donde cada entidad se encarga de tratarlos. Mientras que los lixiviados son líquidos que pueden ser tóxicos y son provenientes de los vertederos. Desgraciadamente, la generación de estos desechos conlleva a grandes cantidades de  $CO_2$  y metano, contribuyendo negativamente al cambio climático. Aunado a esto, se tiene el problema de la contaminación de cuerpos de agua que terminan convirtiéndose en aguas residuales debido a desechos domésticos, municipales en combinación con desechos industriales o en descomposición (Fotografía 1).

Dependiendo de la contaminación de las aguas residuales, pueden ser encontrados microorganismos, bacterias y hasta metales pesados. Los cuales pueden ser utilizados positivamente en celdas de combustible microbiana, y de manera general, son capaces de producir energía eléctrica a través de su descomposición.

En este trabajo, se describen las características y parámetros principales de una CCM.

Además de una revisión de los trabajos que han reportado el uso de residuos municipales junto con lixiviados en la elaboración de las mismas. Con lo cual se busca localizar las combinaciones que permitan obtener mejor rendimiento eléctrico.

## Celdas de combustible microbianas (CCM)

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son dispositivos que convierten la



Fotografía 1. Cuerpo de agua contaminado, situado en el sur de Tamaulipas.

energía bioquímica generada por el metabolismo de desechos orgánicos o actividad catalítica de los microorganismos, en energía eléctrica (Palmore and Whitesides, 1994). Este tipo de celdas de combustible han recibido mucho interés por la comunidad científica, ya que no solo representa una fuente alterna de generación de energía sino también la utilización de materiales de desecho, lo cual representa bajo costo.

### **Elementos constitutivos de una CCM**

De manera general, una CCM está constituida por un separador, sustrato o lixiviado (que es la sustancia que se degrada) y por una cámara anódica y una catódica. Donde son localizados los electrodos conocidos como ánodo y cátodo. El material utilizado para ánodo debe tener propiedades conductoras, no corrosivas, de alta porosidad y gran área superficial. Además, debe presentar las ventajas de ser económico, de fácil fabricación y tener la capacidad para ser escalado a dimensiones mayores. (Logan and Wiley, 2008).

Para el caso del cátodo se utilizan materiales conductores como el carbón con catalizadores de Pt (más utilizado) o catalizadores sin Platino que resultan más económicos. En el caso de los

catalizadores sin Pt se utiliza grafito, o fierro y níquel, de carbono simple o recubiertos de carbono tubular.

El separador es el componente que divide la cámara anódica y catódica. Y permite pasar iones a la otra cámara sin dejar pasar electrones. Dicho separador debe poseer alta calidad de transferencia de protones, baja permeabilidad de gas, buena estabilidad térmica and buena resistencia contra la bioincrustación (adherencia de microorganismos) (Liu and Logan, 2004; Zhao, 2009). Los tipos de membranas más utilizados en la actualidad son: Membrana de intercambios de protones (PEM), Membrana porosa de polímero compuesto, Nafion®, Membrana de intercambio de cationes (CEM), Membrana de intercambio de aniones (AEM) y Membrana bipolar que consiste de la unión de membrana de aniones y cationes (BPM).

El sustrato es el material capaz de degradarse (desecho utilizado). El cual puede ser agua residual de la industria láctea, residuos animales y vegetales. Mientras el inóculo es el microorganismos o bacterias encargadas de la degradación del sustrato. Las cuales pueden encontrarse en dichos residuos o bien agregarse a estos. Entre

los microorganismos reportados destacan: *Clostridium butyricum*, *Escherichia coli*, *Bacillus sp.*, *Enterococcus faecalis*, *Bacillus subterraneus*, *Klebsiella pneumonia*, y *Enterobacter cloaca* (Kamel *et al.*, 2020).

### Topologías de CCM

Entre los tipos de topologías propuestas para las CCM se encuentran las celdas simples, las celdas dobles, y multiceldas. Las celdas simples pueden o no contener membrana, pero solo poseen una cámara en donde se encuentran ubicados el

ánodo y cátodo.

La carencia de una cámara catódica radica en que el cátodo se encuentra en contacto directo con el aire. La característica principal de las celdas de cámara doble es que el ánodo y cátodo se encuentran en su cámara anódica y catódica respectivamente y utilizan separadores. Entre las variantes de estas celdas se pueden mencionar las celdas tipo H, el tipo U y cilíndricas (Figura 1). Así como también reactores que han sido propuestos utilizando biorremediación.

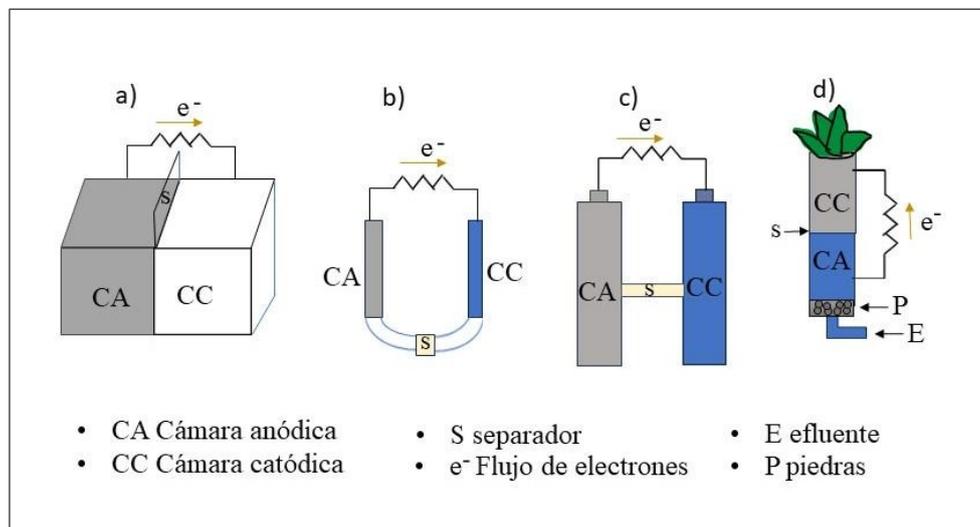


Figura 1: a) Celdas con doble cámara, b) tipo U, c) tipo H y d) con humedales

Las celdas de cámara múltiples como su nombre lo indica son formadas por más de 1 celda conectadas en serie o en paralelo como lo harían las celdas en una pila de combustible. Esto con el fin de alcanzar parámetros eléctricos mayores como la conexión en paralelo que proporciona más potencia.

### Funcionamiento

La cámara anódica además del ánodo contiene el sustrato y el inóculo y la cámara catódica contiene el cátodo y una membrana encargada de separar las dos cámaras. Tal como lo muestra la Figura 2. La cámara anódica es alimentada con un medio de crecimiento o agua residual

como analitos y mediador redox (no requerido en caso de CCM sin mediador). En esta cámara son liberados electrones y protones derivados de la acción de descomposición que el inóculo realiza sobre el sustrato orgánico (catabolismo del sustrato). Los electrones liberados viajan a través de un circuito externo formado por un conductor y una resistencia hacia el cátodo. Mientras que los protones migran a través de la membrana. Así, los electrones, protones y oxígeno procedentes de la cámara anódica, son combinados con el oxígeno de la cámara catódica para formar agua (Das, 2018).

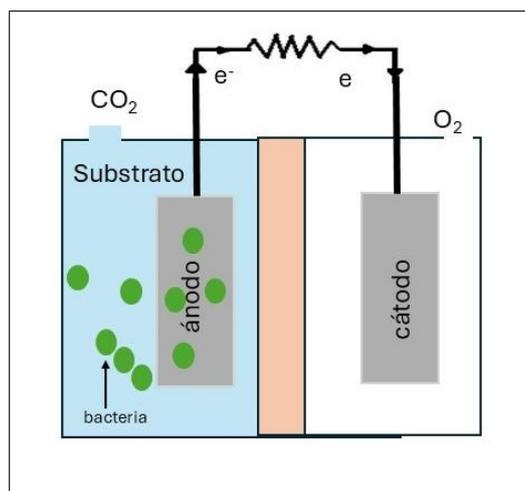


Figura 2: a) Celdas con doble cámara, b) tipo U, c) tipo H y d) con humedales

### Desempeño de CCM

Determinados parámetros como materiales, inóculos, membranas, temperatura, pH y arquitectura de las CCM influyen directamente en el desarrollo y mejoramiento de dichos dispositivos. De esta manera con la modificación o combinación de algunos de estos parámetros se busca la eficiencia y la sustentabilidad de la CCM a un menor costo. La Demanda química de oxígeno, la eficiencia coulombica, densidad de corriente y densidad de potencia permiten evaluar el desempeño de cada dispositivo.

### Demanda química de oxígeno

En una muestra en estado líquido, como las aguas residuales, se encuentran partículas disueltas o suspendidas que tienden a ser oxidadas. La cantidad de oxígeno que se requiere para la descomposición de esta materia orgánica se obtiene por medio de la medición demanda química de oxígeno. Esta prueba resulta útil para el análisis de aguas de residuos industriales.

### Densidad de corriente

La corriente generada por una CCM se denota por  $I_d$  y se mide en Amperes (A). La densidad de corriente se denota

por la corriente por área superficial del electrodo  $A_{ele}$  o por unidad de volumen  $Vol$  de la cámara anódica siendo sus unidades  $A/cm^2$  y  $A/cm^3$ , respectivamente (Sun *et al.* 2016).

La obtención de la máxima generación de electricidad depende de la comunidad bacteriana, de las aguas residuales, la demanda química del oxígeno (DQO) y el pH.

$$I_d = \frac{I}{A_{ele}}$$

### Densidad de potencia

La cantidad de potencia generada  $P_d$  por una celda es el producto del voltaje  $V$  de operación de la celda y la corriente  $I$  a una resistencia específica  $R_e$ . Esta potencia generada se puede tornar inestable debido a los cambios en el metabolismo de los microbios, disminución de actividad de catalizadores, suciedad de membrana y acumulación de residuos. Por lo cual se ha adoptado como más estable el parámetro de densidad de potencia respecto a área de superficie de electrodo o volumen de la cámara anódica.

$$P_d = \frac{V \times I}{Vol}$$

### Eficiencia Coulombica

La eficiencia Coulombica es la relación de la carga total (en Coulombs) transportada al ánodo después de la bioelectro-oxidación del sustrato y la máxima carga disponible o almacenada. Indica que fracción del sustrato fue utilizada por la bacteria para producción de corriente. La eficiencia coulombica indica que la fracción del sustrato fue utilizado por la bacteria para producción de corriente.

Es calculada por la siguiente expresión:

$$CE = \frac{MI}{Fbk\Delta COD}$$

Donde  $k$  corresponde al caudal del afluente de las aguas residuales y  $\Delta COD$  es el cambio de la demanda de química oxígeno del agua residual durante la operación de la CCM por la sustracción final a inicial COD (g/L);  $M$  es la masa molecular de  $O_2$  y  $b$  es el número de electrones requeridos para reducir oxígeno a agua y  $F$  Constante de Faraday.

El objetivo principal de todos los CCM que emplean aguas residuales es lograr una alta eficiencia coulombica para garantizar la electrogénesis. Ciertos enfoques, como la supresión de la metanogénesis en el sistema CCM, la mejora de la catálisis y el uso del colector de corriente adecuado en el reactor, mejoran la eficiencia (Das, 2018).

### CCM utilizando residuos municipales reportadas en los últimos 5 años

En este trabajo se buscaron estudios que han utilizado lixiviados para CCM en los últimos 5 años, en donde fueron encontrados 184. De los cuales, solo son mostrados los enfocados a la creación de CCM con diferentes combinaciones de materiales y sustratos. Así como la generación de energía reportada. Diversos trabajos han resaltado la diferencia de resultados en los parámetros eléctricos, que varía dependiendo de las combinaciones de pretratamientos a los sustratos, configuraciones de las celdas y materiales. De esta revisión se destaca el uso de aguas residuales municipales junto con descargas industriales (Hiegemann *et al.*, 2019), lodos (Guadarrama-Pérez *et al.*, 2019), relleno sanitario (Kamel *et al.*, 2020), aguas con desechos de lácteos (Bolognesi *et al.*, 2021) o agua de alcantarillado (Saeed & Miah, 2021). De las topologías utilizadas se encontraron mayor número de trabajos que utilizan cámara simple debido a que representa mayor simplicidad respecto a las de cámara doble. La mayor densidad de potencia encontrada fue de  $982 \text{ mW/m}^2$ , en el arreglo de humedales alimentado con salida de alcantarillado (Saeed & Miah, 2021). Sin embargo, en este arreglo no se encontró información de CE y COD. En la Tabla 1 se resumen los trabajos encontrados en la literatura de los últimos 5 años enfocados a la creación de la CCM.

Tabla 1

Trabajos /año	Lixiviado	Características estructurales de la celda	Densidad de Potencia ( $P_D$ ), Eficiencia Coulumbica (CE%), Demanda química de oxígeno (COD)
(Martínez and Di Lorenzo, 2019)	Digestato fresco	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cámara simple</li> <li>▪ Ánodo y cátodo de fieltro de grafito</li> <li>▪ Sin membrana</li> <li>▪ Cámara catódica de aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P_D</math>: 51 mW/m<sup>3</sup></li> <li>▪ COD 9945.81 ± 0.28 mg /L</li> </ul>
(Hiegemann <i>et al.</i> , 2019)	Aguas residuales municipales con descargas industriales	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cámara simple cilíndrica</li> <li>▪ Ánodo de cepillo de fibra de grafito</li> <li>▪ Cátodos de acero inoxidable/carbón activado</li> <li>▪ Cámara catódica de aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P_D</math>: 317 mW/m<sup>3</sup></li> <li>▪ CE: 41+16 %</li> <li>▪ COD: 29.5 ± 14 %</li> </ul>
(Guadarrama-Pérez <i>et al.</i> , 2019)	Lodos granulares anaerobios con sedimentos pretratados térmicamente	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reactor de cámara simple productor de hidrógeno. (sMER-<math>H_2</math>)</li> <li>▪ Ánodo: fieltro de carbon</li> <li>▪ Cátodo de aire</li> <li>▪ Membrana de intercambio catiónico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P_D</math>: 46 mW/m<sup>2</sup> y 6.4 W/m<sup>3</sup></li> <li>▪ COD: 33 %</li> </ul>

(Kamel <i>et al.</i> , 2020)	Relleno sanitario con mezcla de <i>Clostridium butyricum</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Bacillus sp.</i> , <i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Bacillus subterraneus</i> , <i>Klebsiella pneumonia</i> , and <i>Enterobacter cloaca</i> .	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cámara simple</li> <li>▪ Ánodo y cátodo: tela de carbón</li> <li>▪ Sin mediador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P_D</math>: 134.5 mW/m<sup>2</sup></li> <li>▪ CE: 55 %</li> <li>▪ COD: 86.6 %</li> </ul>
(Lakshmidivi <i>et al.</i> , 2020)	Residuos sólidos municipales con <i>Synechococcus sp.</i> y microflora anaeróbica	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Doble cámara Asistida por algas de (AAMFC).</li> <li>▪ Ánodo y cátodo electrodos de grafito</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P_D</math>: 95,63 mW/m<sup>2</sup></li> <li>▪ COD: 76.5 %</li> </ul>
(Bolognesi <i>et al.</i> , 2021)	Relleno sanitario Aguas residuales de lácteos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cámara dual</li> <li>▪ Ánodo y cátodo: acero inoxidable recubierto de grafito</li> <li>▪ Separador de intercambio de cationes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P_D</math>: 344 mW/m<sup>3</sup></li> <li>▪ CE = 6.9 %</li> <li>▪ COD: 53.6 %</li> </ul>
(Saeed and Miah, 2021)	Salida de alcantarillado local	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Humedales artificiales con planta Vetiver</li> <li>▪ Placas de acero como electrodos</li> <li>▪ Filtro de biocarbón</li> <li>▪ Separador de lana de vidrio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P_D</math>: 982 mW/m<sup>2</sup></li> <li>▪ No especifica CE ni COD</li> </ul>

(Dordievski <i>et al.</i> , 2022)	Materia orgánica Aguas de desecho municipal y metalúrgicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reactor cilíndrico de doble cámara</li> <li>▪ Ánodo y cátodo tela de carbón con acero inoxidable</li> <li>▪ Membrana de intercambio de protones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ COD 179.2 mg/Lh</li> <li>▪ No especifica <math>P_D</math> y CE</li> </ul>
(Gao <i>et al.</i> , 2023)	Lodos floculantes de semillas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cámara simple</li> <li>▪ Electrodo de cepillo de carbón</li> <li>▪ Membrana de intercambio de protones (PEM)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>2.40 \text{ W/m}^3</math></li> <li>▪ COD 56%</li> <li>▪ No especifica a CE</li> </ul>

## Conclusiones

Las celdas de combustible microbianas se presentan como una alternativa de generación de energía por medio del uso de aguas contaminantes. Se ha demostrado que los residuos municipales junto con lixiviados pueden ser utilizados para este fin, los cuales pueden contener desde diferentes bacterias hasta metales provenientes de alguna industria cercana. La revisión arrojó mayor generación de energía en topologías utilizando humedales, mayor uso de topología de celda simple por su ahorro en una cámara catódica. Respecto a los electrodos predominó mayormente el uso de carbón en tela, cepillo, fieltro o grafito. Las ventajas del uso del CCM radica en la utilización de desechos para generación e energía. Sin embargo, uno de sus principales inconvenientes es la degradación del ánodo que está en contacto directo con bacterias que ocasiona el reemplazo constante. Además de su baja densidad de potencia generada. La cual para poder

ser usada en aplicaciones prácticas tendría que ser escalada utilizando diversos arreglos de varias celdas apiladas requiriendo mucho espacio.

## Referencias

- [1] Bolognesi, S., Ceconet, D., Callegari, A., & Capodaglio, A. G. (2021). Bioelectrochemical treatment of municipal solid waste landfill mature leachate and dairy wastewater as co-substrates. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(19), 24639–24649. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10167-7>
- [2] Das, D. (2018). *Microbial Fuel Cell. A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*, Springer.
- [3] Dordievski, S., Yemendzhiev, H., Koleva, R., Nenov, V., Medić, D., Trifunović, V., & Maksimović, A. (2022). Application of microbial fuel

- cell for simultaneous treatment of metallurgical and municipal wastewater - A laboratory study. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 87(6), 775–784. <https://doi.org/10.2298/JSC211008009D>
- [4] Gao, L., Wei, D., Ismail, S., Wang, Z., El-Baz, A., & Ni, S. Q. (2023). Combination of partial nitrification and microbial fuel cell for simultaneous ammonia reduction, organic removal, and energy recovery. *Bioresource Technology*, 386(September), 129558. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129558>
- [5] Guadarrama-Pérez, O., Hernández-Romano, J., García-Sánchez, L., Gutierrez-Macias, T., & Estrada-Arriaga, E. B. (2019). Simultaneous bio-electricity and bio-hydrogen production in a continuous flow single microbial electrochemical reactor. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 38(1), 297–304. <https://doi.org/10.1002/ep.12926>
- [6] Hiegemann, H., Littfinski, T., Krimmler, S., Lübken, M., Klein, D., Schmelz, K. G., Ooms, K., Pant, D., & Wichern, M. (2019). Performance and inorganic fouling of a submersible 255L prototype microbial fuel cell module during continuous long-term operation with real municipal wastewater under practical conditions. *Bioresource Technology*, 294(July), <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122227>
- [7] Kamel, M. S., Abd-Alla, M. H., & Abdul-Raouf, U. M. (2020). Characterization of anodic biofilm bacterial communities and performance evaluation of a mediator-free microbial fuel cell. *Environmental Engineering Research*, 25(6), 862–870. <https://doi.org/10.4491/eer.2019.412>
- [8] Lakshmidēvi, R., Gandhi, N. N., & Muthukumar, K. (2020). Carbon Neutral Electricity Production from Municipal Solid Waste Landfill Leachate Using Algal-Assisted Microbial Fuel Cell. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 191(2), 852–866. <https://doi.org/10.1007/s12010-019-03160-5>
- [9] Liu, H. & Logan B.E. (2004) Electricity Generation Using an Air Cathode Single Chambers Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane. *Environmental Science & Technology*, 38, 4040-4046. <http://dx.doi.org/10.1021/es0499344>
- [10] Logan, B.E. (2008). *Materials. Microbial Fuel Cells*, 61–84. <https://doi.org/10.1002/9780470258590.ch5>
- [11] Martinez, S. M., & Di Lorenzo, M. (2019). Electricity generation from untreated fresh digestate with a cost-effective array of floating microbial fuel cells. *Chemical Engineering Science*, 198, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.12.039>
- [12] Martinez, S. M., & Di Lorenzo, M. (2019). Electricity generation from untreated fresh digestate with a cost-effective array of floating microbial fuel cells. *Chemical Engineering Science*, 198, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.12.039>
- [13] Saeed, T., & Miah, M. J. (2021). Organic matter and nutrient removal in tidal flow-based microbial fuel cell constructed wetlands: Media and flood-dry period ratio. *Chemical*

- Engineering Journal, 411(January), 128507. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128507>
- [14] Zhao, Feng, Nelli Rahunen, John R. Varcoe, Alexander J. Roberts, Claudio Avignone-Rossa, Alfred E. Thumser, & Robert C. T. Slade. 2009. "Factors Affecting the Performance of Microbial Fuel Cells for Sulfur Pollutants Removal." *Biosensors and Bioelectronics* 24(7):1931–36. doi: 10.1016/J.BIOS.2008.09.030.



**Las nano-computadoras que  
vienen y el misterioso  
componente que podría  
hacerlas realidad**

**Dr. Gerardo Abel Laguna Sánchez**  
Departamento de Sistemas de Información y  
Comunicaciones (DSIC)  
Universidad Autónoma Metropolitana -Lerma

**Abstract**

An explanatory article on memristors, the fourth passive component in electrical circuits, is presented. Although the existence of this component was theoretically foreseen in 1971, it was only relatively recently, in 2008, that such a device was discovered. As we are close to reaching the physical limit for transistor miniaturization, the memristor is becoming increasingly attractive, especially as a key component for the realization of new computing paradigms, particularly those inspired by biological neural networks. If reliable nanometric memristors can be obtained, we would be on the threshold of a new technological era, with the emergence of nano-computers and nano-machines.

**Keywords:** Memristor, memristance, passive components, neuromorphic computing.

**Palabras clave:** Memristor, memristancia, componentes pasivos, computación neuromórfica.

Casi todo lo que vemos a nuestro alrededor, en materia de tecnología digital, tanto de cómputo como de información y comunicaciones electrónicas, está soportado por máquinas construidas a partir de pequeños transistores. ¿Sabías que los primeros transistores, los fabricados en 1968, median alrededor de 20 micrómetros?, es decir 20 millonésimas de un metro, o lo que equivale a tomar un milímetro, dividirlo en mil partes, y ocupar 20 de esas micro-partes. Actualmente un transistor tiene un tamaño de tan sólo 3 nanómetros, lo que equivale a dividir un micrómetro en mil partes y tomar 3 de estas nuevas nano-partes. Esto quiere decir que un transistor actual es 6,666 veces más pequeño que el primero.

Como analogía, piensa en una cancha de fútbol, de 100 metros de longitud, en proporción, si la longitud de esta cancha de fútbol fuera el tamaño del primer transistor, entonces los actuales transistores tendrían la longitud de un timbre postal. Esta dramática reducción en el tamaño de los transistores es una de las razones por las que, mientras que las primeras computadoras digitales ocupaban una habitación completa, ahora las computadoras son muchas veces más poderosas que las primeras, aunque sólo ocupan el espacio de una tarjeta de memoria SIM. Todo esto suena muy bien, pero como dijo el zorrito, en *El Principito* de Antoine de Saint-Exupéry: ¡Uhm, Nada es perfecto!

El inconveniente es que los actuales transistores son tan pequeños que próximamente ya no será posible reducir su tamaño. Además, mientras más pequeños son los transistores, más difícil es garantizar que trabajen en forma confiable. La razón de todo esto es simple, el tamaño actual ya está muy cerca del orden de magnitud del tamaño de los propios átomos que los conforman. Por ejemplo, un átomo de silicio, el material cristalino con el que se construyen los transistores, es de 0.24 nanómetros. Esto quiere decir que un transistor actual mide el equivalente de 12.5 átomos de silicio. Adicionalmente, resulta que, a esta escala nanométrica, es inevitable que los efectos de la mecánica cuántica se hagan presentes, con la consecuente emergencia de incertidumbre. En pocas palabras, a esta escala, la probabilidad de falla de un transistor aumenta significativamente. Para que tengas una idea del orden de magnitud del que estamos hablando, en el ámbito de lo nanométrico, puedes echar un vistazo a la aplicación disponible en el siguiente sitio:

<https://learn.genetics.utah.edu/content/cells/scale/>

### **Nuevas formas de hacer computación**

Por lo pronto, en previsión de los evidentes límites físicos que enfrenta la computación actual, digital y transistorizada, algunos grupos de investigación ya están trabajando en desarrollar muy diversas alternativas para la realización del trabajo que implica todo proceso computacional. En particular, existe una rama emergente de las ciencias computacionales que se denomina cómputo neuromórfico, una disciplina que cada vez adquiere mayor protagonismo (Laguna-Sánchez, 2023).

En pocas palabras, la idea base del cómputo neuromórfico es que toma como inspiración el comportamiento de las neuronas de un tejido cerebral, donde se observa cierta ponderación de los enlaces sinápticos a fin de lograr que la neurona receptora emita su propio pulso o tren de pulsos. La versión electrónica, que de alguna forma emula este comportamiento, se denomina *red neuronal artificial de impulsos* (en inglés, *spiking neural networks* o SNNs). Como otras redes neuronales artificiales del ámbito del aprendizaje maquina (el famoso *machine learning*), las redes neuronales de impulsos también se “entrenan” a fin de poder resolver ciertos problemas específicos, sólo que en estas últimas la forma de codificar la información es mediante señales analógicas, mediante trenes de impulsos, y no en forma digital, como suele hacerse en la computación digital.

Dado que estas redes artificiales ponderan la contribución de cada conexión o “sinapsis” de sus “neuronas” mediante una resistencia, sería muy conveniente contar con resistencias “programables” y, mejor aún, con

resistencias “programables” de tamaño nanométrico. La buena noticia es que, en una fecha relativamente reciente, apenas en el año 2008, se descubrió que es posible fabricar resistencias con esas características, se denominan *memristores* y conforman el cuarto componente básico de los circuitos eléctricos (Choi, 2021).

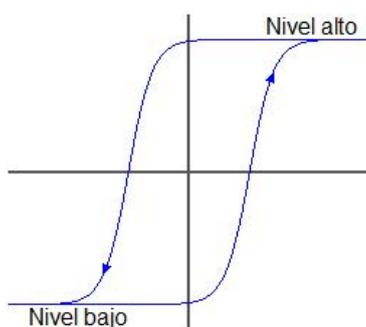
### **Los memristores como dispositivos programables de ínfimo tamaño**

Resulta que los memristores pueden llegar a tener tamaños muy pero muy pequeños, dado que se fabrican con nanotecnología y su principio de operación tiene que ver con la creación de un pequeñísimo canal conductivo, dentro de un sustrato cristalino, a partir del agrupamiento de algunos iones (átomos con polaridad eléctrica) de elementos conductores. Nótese que, en el memristor, a diferencia de los materiales semiconductores tradicionales, lo que se mueve son átomos completos, no sólo los electrones de sus órbitas. El tamaño tan pequeño que pueden llegar a tener los memristores los hace candidatos ideales para construir sistemas de cómputo analógico de muy alta densidad en espacios muy reducidos, más que los actuales dispositivos electrónicos digitales, además de permitir el procesamiento paralelo de la información, ya que esto es mucho más natural en los circuitos analógicos, lo que, a su vez, permite disminuir los tiempos de respuesta. Incluso, se está concibiendo la construcción de neuronas artificiales a partir de memristores (Kumar, 2020).

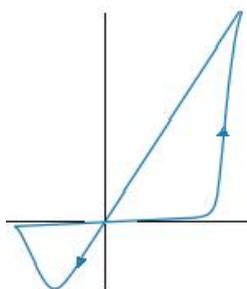
### **El misterioso cuarto componente de los circuitos eléctricos**

El memristor es el cuarto componente de los circuitos eléctricos, entendiéndose que los otros tres son el resistor, el capacitor y el inductor, todos ellos mejor

conocidos. Resulta que los memristores son una suerte de resistencia con memoria, de allí el nombre de memristor. De hecho, presentan un comportamiento que se puede representar gráficamente mediante una curva de histéresis. Una curva de histéresis es una gráfica que resulta de graficar dos trayectorias para unir dos niveles: una trayectoria permite pasar del nivel bajo al nivel alto, mientras que la otra es la que permite retornar al nivel bajo partiendo del nivel alto. Una gráfica de histéresis típica es como la que sigue:



Las curvas características de los memristores muestran un comportamiento de histéresis más tortuoso, pero la idea es la misma: seguir una ruta en un sentido y otra en sentido contrario. De hecho, las curvas de histéresis de los memristores se caracterizan por mostrar un cruce entre las dos posibles rutas, resultando en una curva con forma de ocho o, como dicen los estudiosos de los memristores, una curva de histéresis “pellizcada”. Algo como lo que sigue:



La curva de histéresis revela cierta memoria en el comportamiento observado, en tanto que el comportamiento actual depende de la trayectoria o “historial” en los instantes anteriores. Precisamente, esta característica de memoria es lo que vuelve tan atractivos y convenientes a los memristores dentro del campo del cómputo neuromórfico, en general, y para su aplicación de las redes neuronales artificial de impulsos, en particular.

### Leon Chua como profeta de los memristores

Para poder entender lo que es un memristor es necesario tener muy claro cuáles son las relaciones que existen entre los resistores, los capacitores y los inductores con las variables eléctricas involucradas. De hecho, fue justo del análisis de estas relaciones lo que le permitió a Leon Chua, un investigador de la Universidad de Berkeley, determinar teóricamente, en 1971, la posibilidad de la existencia de un cuarto componente: el *memristor*. Por aquel entonces, Leon Chua escribió (Chua, 1971, p. 519):

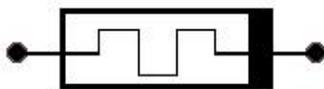
*“... aunque aún no ha sido descubierto físicamente un memristor, el análisis realizado a partir de la teoría de los circuitos y de lo electromagnético cuasi-estático, hacen plausible la noción de que podría ser inventado o descubierto, en forma accidental, un dispositivo memristor.”*

Y, en efecto, así ocurrió en 2008, 37 años después del pronóstico de Leon Chua, en los laboratorios de la empresa Hewlett Packard (HP), cuando el equipo liderado por R. Stanley Williams consiguió construir un dispositivo que correspondía, en cuanto a su comportamiento, con la previsión teórica que Leon Chua

había desarrollado para los memristores (Strukov, 2008).

Actualmente, existen múltiples grupos de investigación, tanto en la academia como en la industria, trabajando para obtener un memristor suficientemente maduro y poder explotarlo en forma comercial. Por ahora se trata de un sector emergente y en pleno desarrollo. El principal problema con los memristores disponibles actualmente es que su comportamiento es muy variable e inestable, tanto respecto de sí mismos, como respecto de otros dispositivos construidos en forma idéntica (Laguna-Sánchez *et al.*, 2023). Todo indica que la variabilidad es una consecuencia inherente a los efectos de la física cuántica, que se hacen presentes en estos dispositivos que trabajan a partir de la creación de canales conductivos nanométricos, conformados por escasos átomos ionizados. Si los fabricantes de componentes electrónicos llegan a fabricar memristores nanométricos confiables, estaríamos ante el umbral de una nueva era tecnológica, con la previsible irrupción y producción de nano-computadoras y de nano-máquinas.

Aunque, a la fecha, no se ha definido un símbolo esquemático estándar para el memristor,  $M$ , a continuación, se presenta el que más a menudo aparece en la literatura especializada:



Por ahora, podemos adelantar que la propiedad de resistencia con memoria se le llama memristancia y se especificarla en ohms ( $\Omega$ ). La explicación, con más detalle, de lo que implica la memristancia la haremos más adelante,

cuando abordemos el esquema de los cuatro componentes.

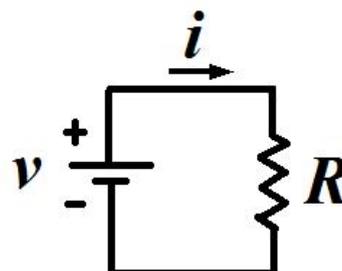
### Un rápido repaso de los tres componentes pasivos que son bien conocidos

Antes de poder explicar lo que es un memristor, primero debemos repasar brevemente lo que son los otros tres componentes: el resistor, el capacitor y el inductor. Vale la pena comentar que los cuatro componentes que describiremos cuentan únicamente con dos terminales.

Comencemos por el primer componente: el resistor. Un resistor es un dispositivo cuya principal característica es que se compone de un material que, aunque conductor, presenta cierta magnitud de oposición al paso de la corriente eléctrica. La magnitud de oposición al paso de la corriente de un resistor es lo que se denomina resistencia,  $R$ , y se mide en ohms ( $\Omega$ ) y su símbolo en los diagramas eléctricos es el siguiente:



Si conectamos un resistor a una fuente de alimentación, de tal forma que se le aplique una diferencia de potencial en sus extremos, medida en unidades de voltios (V), entonces circulará por el resistor una corriente, medida en unidades de amperios (A). Por ejemplo, si la fuente de alimentación es una batería el circuito quedaría como sigue:



En estas condiciones, la corriente que circula por el resistor (denotada con  $i$ ) es directamente proporcional a la diferencia de potencial (denotada con  $v$ ) que se le aplica, e inversamente proporcional a la magnitud de la resistencia (denotada con  $R$ ). Este comportamiento se expresa, en forma muy simple, mediante la denominada ley de Ohm:

$$i = \frac{v}{R}$$

Esta expresión describe, con claridad, cómo el valor de  $i$  depende directa y proporcionalmente de  $v$ , a la vez que inversa y proporcionalmente respecto de  $R$ . A saber, si  $v$  aumenta, entonces  $i$  aumenta; si  $v$  disminuye, entonces  $i$  también disminuye. Por otro lado, si  $R$  aumenta, entonces  $i$  disminuye; si  $R$  disminuye, entonces  $i$  aumenta.

Vamos ahora con el segundo componente: el capacitor. Se trata de un componente construido bajo el principio de mantener dos superficies conductoras, una frente a la otra y separadas por un material aislante, con el fin de que pueda retenerse carga debido a la natural atracción entre cargas, de signo opuesto, que se alojan en cada extremo. La idea es que, al aplicar una diferencia de potencial en sus extremos, el extremo negativo del capacitor acumulará electrones (los elementos de carga negativa), mientras que el extremo positivo se caracterizará por las cargas positivas que corresponden las vacantes que dejaron los electrones que migraron al extremo negativo. La característica que permite al capacitor almacenar energía a partir de la carga eléctrica,  $q$ , así como los efectos derivados de todo cambio en la diferencia de potencial, se le denomina capacitancia,  $C$ , y se especifica en unidades de faradios (F). El símbolo esquemático de un capacitor es el siguiente:



Más adelante, cuando estudiemos el esquema de los cuatro componentes, bosquejaremos la operación del capacitor, en términos de la diferencia de potencial,  $v$ , y de la carga almacenada,  $q$ .

Ahora toca el turno al tercer componente: el inductor. Un inductor se construye al bobinar un cable, es decir un alambre conductor con recubrimiento aislante, sobre la superficie de un cilindro cuya alma presenta cierta permeabilidad magnética. Dado que una corriente eléctrica genera automáticamente un campo magnético, como una envolvente invisible que rodea al cable, el bobinado del cable permite sumar el campo magnético de cada una de las vueltas de este. El hecho es que la envolvente magnética aumenta su densidad de flujo,  $\varphi$ , conforme aumenta la corriente. Una vez que se forma un campo, con una cierta densidad de flujo, basta con que se interrumpa el flujo de corriente que lo generó para que el campo magnético se repliegue al interior del cable. Este movimiento de repliegue del campo tiene la propiedad de inducir una corriente eléctrica con la misma dirección que la corriente interrumpida. Es decir, que el campo magnético acumulado por la bobina también representa un cierto almacenamiento de energía a partir de la densidad de flujo de este. Esta propiedad del inductor de almacenar energía a partir de la densidad del flujo magnético o de inducción,  $\varphi$ , así como los efectos derivados de todo cambio en la corriente, se denomina inductancia,  $L$ , y se especifica en unidades de henrios (H). El símbolo esquemático de un inductor es el siguiente:



La operación del inductor, en términos de la corriente,  $i$ , y de la densidad de flujo,  $\varphi$ , será retomada en seguida, cuando abordemos el esquema de los cuatro componentes.

### El esquema de los cuatro componentes: la clave detrás del pronóstico de Leon Chua

Se trata de un diagrama que muestra a los cuatro componentes  $R$ ,  $C$ ,  $L$  y  $M$ , así como la relación que guarda cada uno de ellos con las variables electro-magnéticas  $v$ ,  $i$ ,  $q$  y  $\varphi$ . El esquema es el que se muestra en la figura 1.

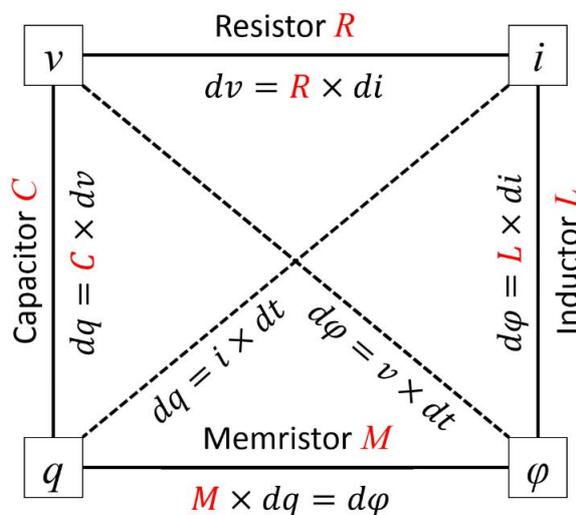


Figura 1: Esquema de los cuatro componentes.

Este esquema pudiera parecer, a primera vista, algo de difícil comprensión, pero no lo es tanto si tomamos en cuenta algunos conceptos básicos. Por su puesto que esto está debidamente soportado por el cálculo diferencial e integral pero, en aras de facilitar la exposición de la idea importante que se encuentra detrás de todo esto, relajaremos el rigor

formal en favor de una aproximación intuitiva. Lo primero, es que  $d$  es la notación empleada para hacer referencia a cambios o diferencias, mucho muy pequeños, observados en las variables. Lo segundo, es que el operador matemático que nos permite obtener la razón de cambio, en cada instante, para una cierta función del tiempo se conoce como derivada. Lo tercero y último, es recordar que el operador de derivación tiene como operador dual el operador de integración. Es decir que, para expresar que derivamos una función,  $f$ , cuyo desarrollo depende del tiempo, respecto del propio tiempo,  $t$ , hacemos:

$$\frac{df}{dt} = g(t)$$

Por otro lado, para recuperar la función original,  $f$ , a partir de la expresión de su derivada,  $\frac{df}{dt}$ , recurrimos al operador de integración, algo aproximado a lo siguiente:

$$f = \int g(t) dt$$

Aclarado todo esto, sólo resta comentar que en el diagrama de los cuatro componentes se asume que tanto la diferencia de potencial que se aplica a un componente,  $v$ , como la corriente que lo atraviesa,  $i$ , ambos son funciones del tiempo.

Ahora, estamos listos para explicar lo que se expone en el esquema de los cuatro componentes de la figura 1. Comenzaremos por el componente más simple de todos: el resistor. En la parte superior del esquema de la figura 1, se puede apreciar la siguiente relación:

$$dv = R \times di$$

que podemos leer como “*todo cambio en el potencial (observado en los extremos del resistor) es directamente proporcional*

al cambio en el valor de la corriente (a través del resistor), ponderada por el valor de la resistencia”. Si despejamos a  $di$ , tenemos

$$di = \frac{dv}{R}$$

que no es más que la ley de Ohm, llevada al límite, para el cálculo de la corriente instantánea, que se puede leer como “el cambio en la corriente es directamente proporcional al cambio en el potencial e inversamente proporcional al valor de la resistencia”. Más aún, si ahora despejamos  $R$ , tenemos

$$R = \frac{dv}{di}$$

Dado que tanto el cambio en el potencial,  $dv$ , como el cambio en la corriente,  $di$ , están referidos al mismo incremento en el tiempo,  $dt$ , este cociente no depende del tiempo y, por lo tanto, la resistencia,  $R$ , es una magnitud constante e invariante en el tiempo.

Vamos ahora con el capacitor, cuyas relaciones se muestran en el lado izquierdo del esquema de la figura 1:

$$dq = C \times dv$$

que podemos leer como “el cambio en la carga (almacenada en el capacitor) es directamente proporcional al cambio en el potencial (observado en los extremos del capacitor), ponderado por el valor de la capacitancia”. Esta expresión también implica que, en un capacitor, la carga almacenada en el mismo depende esencialmente del potencial que se le aplica en sus extremos. Es el turno del inductor, cuyas relaciones se muestran en el lado derecho del esquema de la figura 1:

$$d\phi = L \times di$$

que podemos leer como “el cambio en la densidad de flujo (en el campo

magnético que envuelve al inductor) es directamente proporcional al cambio en la corriente (que circula por el cable de este), ponderada por el valor de la inductancia”. Esto también implica que, en un inductor, la densidad del flujo magnético que lo rodea depende esencialmente de la corriente que circula por su cable devanado.

### Eureka

Finalmente, podemos explicar las relaciones que explican el funcionamiento de un memristor. Sus relaciones aparecen en la parte inferior del esquema de la figura 1. En su momento, en 1971, Leon Chua analizó las relaciones que hemos descrito aquí y se percató de que nada impedía que pudiera existir un componente en el que se produjera un cambio en la densidad del flujo como resultado, directamente proporcional, de un cambio en la carga de este. Esta relación de proporcionalidad directa podría estar, además, ponderada por la magnitud que él denominó memristancia,  $M$ . Veamos las implicaciones de la conjetura de Leon Chua. Entonces, tenemos que las relaciones fundamentales del memristor se expresan como

$$M \times dq = d\phi$$

que podemos leer como “el cambio en la densidad de flujo del memristor es directamente proporcional al cambio en la carga de este y ponderado por el valor de la memristancia”. Todo esto suena un poco extraño: se trata de un componente que, de alguna forma, almacena energía mediante carga eléctrica y que, al mismo tiempo, almacena energía en la densidad de un campo magnético. Vamos a manipular la expresión para ver si podemos llegar a una expresión más intuitiva. En el esquema de la figura 1, observamos que se colocan dos relaciones que cruzan el espacio entre las variables, se trata de las siguientes relaciones:

$$dq = i \times dt$$

y

$$d\varphi = v \times dt$$

Si las arreglamos para que describan a la corriente y al potencial, respectivamente, tenemos:

$$i = \frac{dq}{dt}$$

y

$$v = \frac{d\varphi}{dt}$$

que no son más que la tasa de cambio instantáneo para la carga (lo que se traduce en una corriente) y la tasa de cambio instantáneo para la densidad de flujo (lo que se traduce en un potencial), respectivamente. Estas expresiones sí nos ofrecen mayor intuición sobre lo que ocurre, ya que, en efecto, una corriente es el resultado de un cambio de carga en un cierto tiempo. Por otro lado, un cambio de densidad de flujo magnético en un cierto tiempo, en efecto, está vinculado a la inducción de una fuerza electromotriz que se mide en voltios. Ahora veamos lo que ocurre si sustituimos las relaciones de los cruces en la expresión del memristor. Sea

$$M \times dq = d\varphi$$

Tomando en cuenta que

$$dq = i \times dt$$

y

$$d\varphi = v \times dt$$

Podemos jugar con estas relaciones haciendo:

$$M \times i \times dt = v \times dt$$

y acomodar para dejar como

$$M = \frac{v \times dt}{i \times dt}$$

Luego, asumiendo que el incremento en el tiempo,  $dt$ , es el mismo, tanto para el numerador como para el denominador, entonces queda

$$M = \frac{v}{i}$$

que, bajo el supuesto inicial de dependencia temporal de  $v$  e  $i$ , se puede expresar como

$$M(t) = \frac{v(t)}{i(t)}$$

un cociente cuya forma es la misma que la que determina la ley de Ohm para el cálculo de la resistencia:

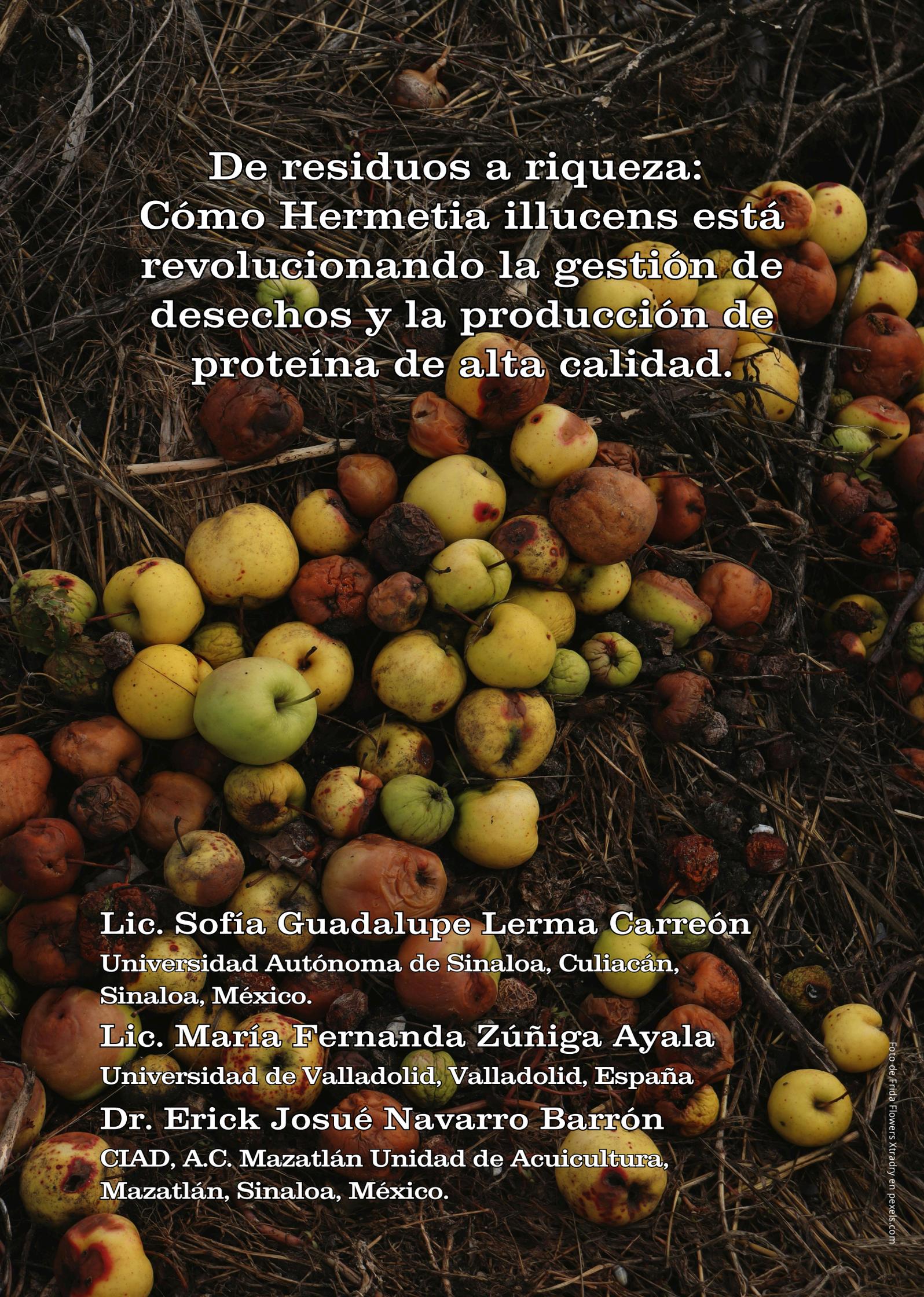
$$R = \frac{v}{i}$$

Por lo tanto,  $M(t)$ , es una expresión que arroja el valor de la resistencia instantánea para el memristor. ¡Eureka! Ya queda clara la diferencia entre un simple resistor y un memristor: mientras que la resistencia,  $R$ , es una magnitud constante e invariante en el tiempo (no cambia a lo largo del tiempo), la memristancia  $M$ , sí es una función del tiempo (su desarrollo depende del tiempo. Tanto la resistencia como la memristancia se miden en unidades óhmicas ( $\Omega$ ), pues en los dos componentes se presenta una magnitud de oposición al paso de la corriente, solo que en el resistor se mantiene constante, mientras que en el memristor cambia conforme transcurre el tiempo.

## Referencias

- [1] Choi, C., Brainwave: If memristors act like neurons, put them in neural networks, *Online IEEE Spectrum*, 2021. <https://spectrum.ieee.org/memristor-random>
- [2] Chua, L., Memristor-The missing circuit element, *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 18, no. 5, pp. 597–519, 1971. <https://doi.org/10.1109/TCT.1971.1083337>

- [3] Kumar, S. *et al.* Third-order nanocircuit elements for neuromorphic engineering, *Nature*. Vol 585, No. 24, pp. 518-523. Sep. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2735-5>
- [4] Laguna-Sánchez, G., *Cómputo neuromórfico: actualidad y perspectivas*, *Contactos, Revista de educación en ciencias e ingeniería*, No. 128, enero-marzo, pp. 19-35, CDMX, 2023. ISSN: 2683-2607. En línea: <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/270>
- [5] Laguna-Sanchez, G.; Lopez-Guerrero, M. and Barron-Fernandez, R., The probabilistic behavior of the set and reset thresholds in Knowm's SDC memristors: Characterization and Simulation, *IEEE Latin America Transactions*, Vol.21. No. 12, pp. 1266–1274, 2023. e-ISSN 1548-0992. DOI: 10.1109/TLA.2023.10305237. En línea <https://latamt.ieeeer9.org/index.php/transactions/article/view/8308>
- [6] Strukov, D. *et al.*, The missing memristor found, *Nature*, vol. 453, pp. 80–83, 2008. <https://doi.org/10.1038/nature06932>



**De residuos a riqueza:  
Cómo *Hermetia illucens* está  
revolucionando la gestión de  
desechos y la producción de  
proteína de alta calidad.**

**Lic. Sofía Guadalupe Lerma Carreón**  
Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán,  
Sinaloa, México.

**Lic. María Fernanda Zúñiga Ayala**  
Universidad de Valladolid, Valladolid, España

**Dr. Erick Josué Navarro Barrón**  
CIAD, A.C. Mazatlán Unidad de Acuicultura,  
Mazatlán, Sinaloa, México.

## Abstract

This article discusses the use of *Hermetia illucens*, or black soldier fly, in the bioconversion of organic waste, highlighting its ability to convert waste into animal protein and fertilizer. The ecological and economic benefits of this process are described, along with the results of an experiment using agricultural and fishery waste, showing the larvae's potential to degrade waste and produce protein biomass. Finally, the opportunities and challenges of scaling up this technology are explored.

**Keywords:** Bioconversion, waste management, animal protein, black soldier fly.

## Resumen

Se aborda el uso de *Hermetia illucens* o mosca soldado negra en la bioconversión de residuos orgánicos, destacando su capacidad para convertir desechos en proteína animal y fertilizante. Se describen los beneficios ecológicos y económicos de este proceso, así como los resultados de un experimento con residuos agrícolas y pesqueros, que demuestran el potencial de las larvas para degradar residuos y generar biomasa proteica. Finalmente, se exploran las oportunidades y desafíos de implementar esta tecnología a mayor escala.

**Palabras clave:** Bioconversión, gestión de desechos, proteína animal, mosca soldado negra.

## Introducción

Toda actividad humana genera desechos, ya sean orgánicos o inorgánicos. A lo largo del tiempo, los seres humanos hemos desarrollado diversas formas para gestionarlos, aunque muchas no han sido las más sostenibles. Los residuos orgánicos, en particular,

presentan desafíos debido a su rápida descomposición. Sin embargo, una solución innovadora está transformando este problema en una oportunidad: *Hermetia illucens*, la mosca soldado negra (Oviedo, 2017). Este insecto convierte desechos orgánicos en larvas ricas en proteínas, valiosas para la alimentación animal. Además, el subproducto conocido como "frass" puede emplearse como fertilizante orgánico. Aunque el cultivo de la mosca soldado negra es relativamente nuevo, ha demostrado un gran potencial ecológico y económico (Lopes *et al.*, 2022), revolucionando la manera en que gestionamos los desechos orgánicos.

## Ciclo de vida y características de la *H. illucens*

El ciclo de vida de la mosca soldado negra tiene cinco etapas: huevo, larva, prepupa, pupa y mosca. Los huevos tardan 5 días en eclosionar, la fase larvaria se extiende por hasta 20 días, y la etapa de prepupa dura unos 5 días más. En su fase de pupa, el insecto se transforma durante aproximadamente dos semanas antes de convertirse en una mosca adulta, que vive solo de los nutrientes acumulados durante su etapa larvaria, sobreviviendo entre 2 y 3 semanas (Figura 1).

Las larvas recién nacidas crecen rápidamente, impulsadas por una alta actividad enzimática en su sistema digestivo. Las moscas adultas tienen un aspecto distintivo: cuerpo oscuro con alas marrones o negras, antenas largas y patas negras con puntas blancas, lo que les da una apariencia similar a la de una avispa (Bullock *et al.*, 2015).

A diferencia de otras moscas, las moscas soldado negras no pican ni transmiten enfermedades. No son buenos voladores y suelen encontrarse

cerca de instalaciones de producción animal. Además, su larva juega un papel crucial en la revalorización de residuos orgánicos, que usa como alimento (Cabrera y López, 2021). El subproducto que generan, conocido como “frass”, es un excelente fertilizante rico en nutrientes como nitrógeno, fósforo y

potasio.

Otro aspecto que hace destacar a la larva como fuente de proteína es su riqueza en aminoácidos esenciales como isoleucina, leucina y lisina, lo que la convierte en una opción prometedora para la alimentación animal (Cullere, 2016).



Figura 1: Ciclo de vida de la mosca soldado negro desde el huevo hasta su etapa adulta.

### La magia de la bioconversión

La mosca soldado negra es uno de los insectos más destacados para la bioconversión de desechos orgánicos en recursos valiosos como proteínas, grasas y sustancias bioactivas. Este proceso es ambientalmente amigable y sostenible. Los residuos que utiliza incluyen desechos alimentarios, subproductos agroindustriales y residuos animales y vegetales, lo que otorga un valor económico adicional en la cadena alimentaria (Franco *et al.*, 2021).

Las larvas de la mosca soldado negra son capaces de convertir y recuperar nutrientes de compuestos orgánicos,

reduciendo la biomasa residual hasta en un 60%. Esto es posible gracias a las funciones de su sistema digestivo, dividido en tres secciones con distintos niveles de acidez (pH). Estas diferencias permiten una mayor actividad enzimática, facilitando la digestión de nutrientes y la eliminación de sustancias nocivas, al tiempo que establecen una microbiota intestinal eficiente (Surendra *et al.*, 2020).

El crecimiento demográfico y la creciente demanda de alimentos han generado problemas como el agotamiento de recursos y el cambio climático. En este contexto, las larvas de la mosca soldado negra se consideran una

solución ecológica y eficiente, ya que su cultivo requiere menos recursos como tierra y agua en comparación con otras fuentes proteicas. Además, la grasa de estos insectos puede ser una alternativa económica y sostenible para satisfacer la demanda de aceites vegetales y biocombustibles, productos tradicionalmente asociados con la deforestación y la pérdida de biodiversidad en regiones tropicales (Franco *et al.*, 2021).

### **Aplicaciones nutricionales y beneficios digestivos de *H.illucens***

Reducir la pérdida y el desperdicio de alimentos tiene grandes beneficios para la sostenibilidad.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2022), los alimentos desperdiciados generan entre el 8% y el 10% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Abordar este problema no solo ayuda a mitigar el cambio climático, sino que también mejora la seguridad alimentaria y la eficiencia de los sistemas agroalimentarios. Además, la reducción del desperdicio permite recuperar nutrientes valiosos, lo que contribuye a mejorar el impacto ambiental.

Se estima que aproximadamente el 14% de los alimentos producidos a nivel mundial se pierden entre el momento de la cosecha y su venta al por menor (FAO, 2017). A esto se suma que un 17% de los alimentos disponibles para los consumidores termina desperdiciándose en los hogares y tiendas, lo que representa una pérdida significativa de recursos que podrían haberse aprovechado. Este desperdicio no solo genera un impacto ambiental, sino que contribuye a fenómenos meteorológicos extremos como sequías e inundaciones, afectando la calidad de

los cultivos y la seguridad alimentaria a nivel global (FAO, 2017).

Por otro lado, las larvas de *H. illucens* han demostrado ser una alternativa prometedora como fuente de proteína en la acuicultura. En estudios realizados con especies como el salmón del Atlántico y la trucha arcoíris, se ha comprobado que reemplazar hasta el 50% de la harina de pescado con estas larvas no afecta negativamente el crecimiento de los peces ni la calidad de sus filetes. Las larvas ofrecen un perfil nutricional rico en proteínas (36-48%) y grasas (31-33%), con un balance de aminoácidos esenciales que cumple con las necesidades alimenticias de estas especies (Rimoldi *et al.*, 2021).

Además de sus propiedades nutricionales, la mosca soldado negra también contribuye a mejorar la salud intestinal de los peces.

La inclusión de sus larvas en la dieta puede favorecer la proliferación de bacterias beneficiosas como las bacterias lácticas, conocidas por sus efectos probióticos. La quitina presente en su exoesqueleto también tiene propiedades antimicrobianas y prebióticas, lo que ayuda a combatir bacterias perjudiciales y mejora la salud digestiva de los peces (Rimoldi *et al.*, 2021).

Por último, las larvas de *H. illucens* contienen altos niveles de aminoácidos esenciales como la leucina, lisina y valina, que superan los niveles presentes en fuentes como la soya y las dietas convencionales de pescado.

Estos aminoácidos son absorbidos eficientemente por aves de corral y ganado porcino, lo que resalta el valor nutricional de estas larvas como una fuente de proteína sostenible (Smets *et al.*, 2020).

### Crecimiento de las larvas de *H. illucens* alimentadas con desechos agrícolas y pesqueros

Estudios recientes evaluaron el crecimiento de las larvas de *H. illucens* alimentadas con diferentes tipos de residuos orgánicos. Tras eclosionar en una dieta estándar conocida como Gainesville, las larvas fueron separadas en grupos y alimentadas con distintas proporciones de desechos de mango (pulpa y cáscara) o de pescado (vísceras y piel). Los grupos incluyeron dietas con inclusiones del 25%, 50% y 100% de estos residuos, junto con un grupo control que se alimentó únicamente con la dieta estándar.

Los resultados mostraron que las larvas alimentadas con la inclusión de desechos de mango al 50% alcanzaron un mayor peso que las alimentadas

solo con la dieta estándar (Figura 2). Sin embargo, las larvas alimentadas únicamente con desechos de mango presentaron un crecimiento mínimo, probablemente debido a la composición del hueso del mango, que dificultó su digestión. Por otro lado, en el caso de los desechos de pescado, tanto la inclusión del 25% como la del 50% en la dieta produjeron un mayor peso en comparación con las larvas del grupo control. Incluso las larvas alimentadas exclusivamente con desechos de pescado (100%) alcanzaron buenos rendimientos de peso final (Figura 3). Estos resultados refuerzan el potencial de *H. illucens* para aprovechar desechos agrícolas y pesqueros, subrayando su capacidad de bioconversión y la generación de biomasa rica en nutrientes para diversas aplicaciones.

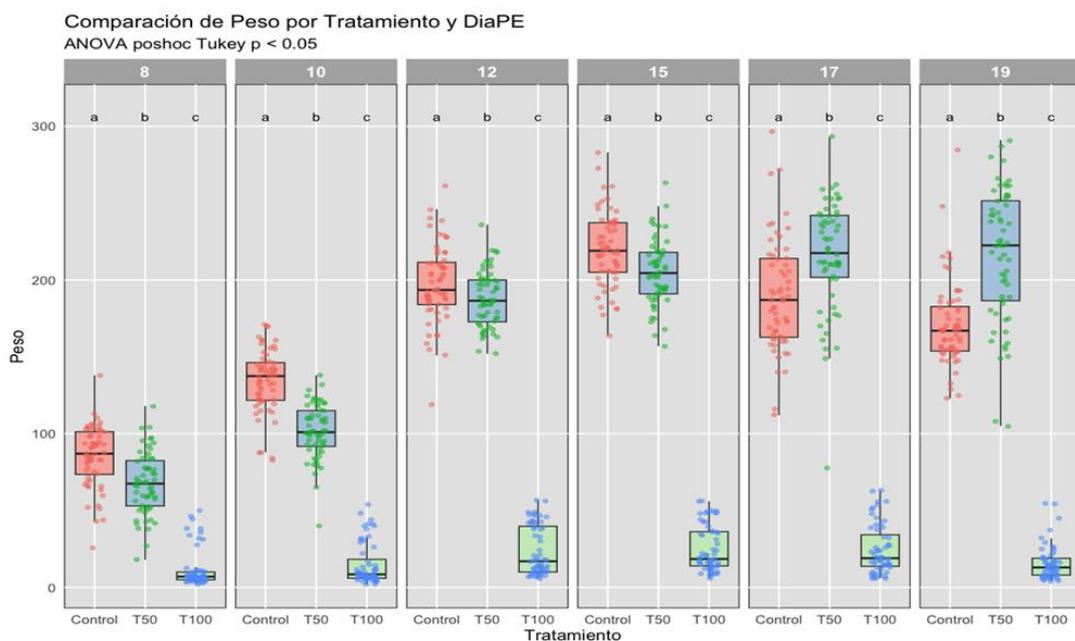


Figura 2: Bioensayo de crecimiento de larvas de mosca soldado negra alimentadas con una dieta Control (mezcla de maíz, trigo y alfalfa), una inclusión de 50% de residuos de mango (cáscara y hueso) en la dieta estándar (T50) y una dieta de 100% residuos de mango (T100). Resultados de un bioensayo llevado a cabo por Carreón S. (2024).

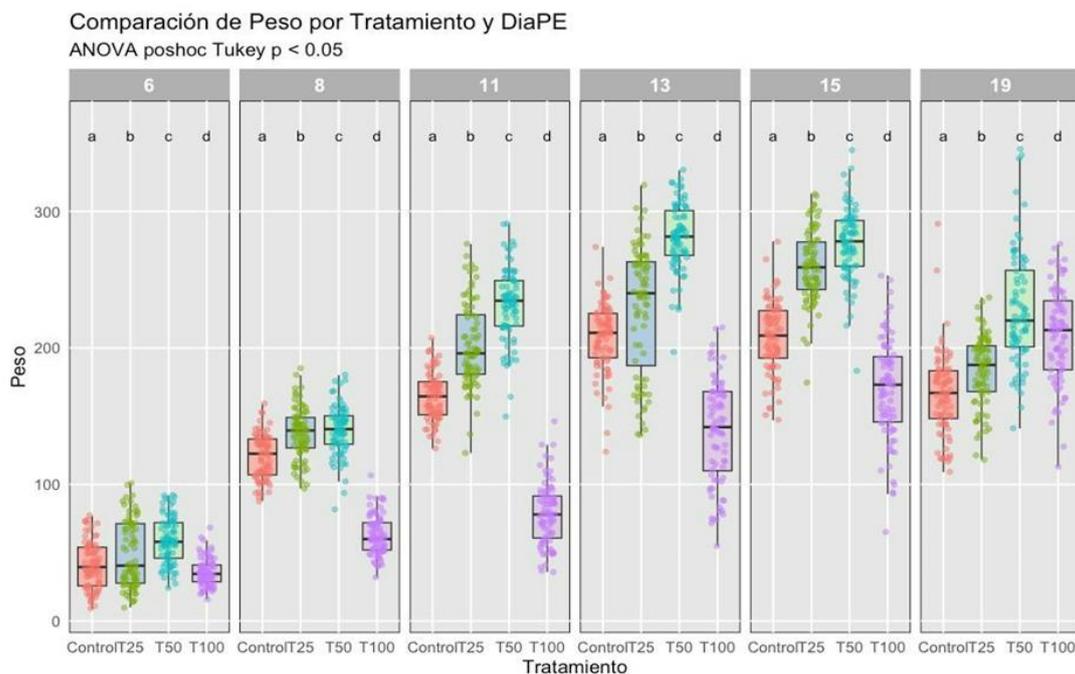


Figura 3: Crecimiento de larvas de mosca soldado negra alimentadas con una dieta Control (mezcla de maíz, trigo y alfalfa), una inclusión del 50% de residuos de pescado (piel y vísceras) en la dieta control (T50) y una dieta con 100% residuos de pescado (T100). Resultados de un bioensayo llevado a cabo por Carreón S. (2024).

### Desafíos y oportunidades

La gestión de los desechos orgánicos generados por la industria alimentaria sigue siendo un desafío global. La creciente producción de residuos plantea serios problemas ambientales, desde la contaminación hasta la emisión de gases de efecto invernadero.

En este contexto, la mosca soldado negra emerge como una solución prometedora para transformar esos residuos en recursos valiosos. Sin embargo, uno de los principales desafíos que enfrenta la implementación de esta tecnología es la creación de infraestructuras eficientes para la cría a gran escala de esta especie y su integración en los sistemas industriales (Olvera, 2022).

Las oportunidades que ofrece son múltiples. El cultivo de la mosca soldado negra no solo permite el aprovechamiento de desechos, sino que también genera proteína animal de alta calidad, contribuyendo a la seguridad

alimentaria, especialmente en regiones donde el acceso a alimentos es limitado. Además, su bajo requerimiento de agua y recursos, sumado a su capacidad para reducir emisiones de gases de efecto invernadero, la posicionan como una alternativa sostenible y ecológica frente a los métodos tradicionales de producción de proteína.

El futuro del uso de *Hermetia illucens* puede revolucionar tanto la gestión de desechos como la producción de proteínas, ofreciendo una vía para reducir el impacto ambiental y combatir la inseguridad alimentaria. Sin embargo, para aprovechar todo su potencial, es necesario invertir en investigación, innovación tecnológica y generar conciencia pública sobre sus beneficios. Con el enfoque adecuado, esta especie podría convertirse en una herramienta clave para un futuro más sostenible, donde los residuos se transformen en riqueza y recursos nutritivos.

## Conclusión

La mosca soldado negra nos demuestra que la naturaleza tiene respuestas innovadoras a los desafíos creados por el ser humano. La capacidad de esta especie para transformar residuos en recursos valiosos, como proteína y fertilizante, ofrece una vía hacia un futuro más eficiente y sostenible. Sin embargo, aprovechar su potencial va más allá de implementar esta tecnología; nos invita a reconsiderar cómo gestionamos nuestros desechos y a valorar la integración de la ciencia con los procesos naturales.

El éxito en la adopción de esta tecnología dependerá de nuestra habilidad para combinar la innovación científica con las soluciones que ya nos ofrece la naturaleza. La clave para un futuro más sustentable está en trabajar en armonía con nuestro entorno, usando tanto el conocimiento como los recursos naturales para afrontar los retos ambientales y crear un equilibrio entre producción y conservación.

## Referencias

- [1] Bullock, N., Chapin, E., Evans, A., Elders, B., Givens, M., & Jeffay, N. (2015). Optimal conditions for BSFL in The Black Soldier Fly How to Guide. Fayetteville: UNC-Chapel Hill. Carolina del Norte 4-5.
- [2] Cabrera D. & López A. (2021). Evaluación de la larva de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) como alternativa para la degradación de residuos sólidos urbanos. Trabajo de grado, Fundación Universidad de América, Repositorio Institucional Lumieres Bogotá, marzo de 2021. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/8329>.
- [3] FAO (2017). Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe. Boletín 4. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de <https://www.fao.org/documents/card/en/c/CA1552ES/>. Consultado el 08 de julio de 2024.
- [4] FAO (2022). Hacer frente a la pérdida y el desperdicio de alimentos: una oportunidad de ganar por partida triple. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Recuperado de <https://www.fao.org/newsroom/detail/FAO-UNEP-agriculture-environment-food-loss-waste-day-2022/es>. Consultado el 14 de agosto de 2024.
- [5] Franco, A., Scieuzo, C., Salvia, R., Petrone, A. M., Tafi, E., Moretta, A., Schmitt, E., & Falabella, P. (2021). Lipids from *Hermetia illucens*, an innovative and sustainable source. *Sustainability*, 13(18), 10198. <https://doi.org/10.3390/su131810198>.
- [6] Lerma, S. 2024. Cultivo y análisis metagenómicos de larva de mosca soldado negro (*Hermetia illucens*) alimentadas con residuos orgánicos para la identificación taxonómica y funcional de la microbiota intestinal. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México (2024).
- [7] Lopes, I. G., Yong, J. W., & Lalander, C. (2022). Frass derived from black soldier fly larvae treatment of biodegradable wastes. A critical review and future perspectives. *Waste Management*, 142, 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.007>.
- [8] Olvera, M., García, F., & Gutiérrez, C. (2022). Mosca soldado negra:

- eslabón perdido en la cadena de revalorización de residuos orgánicos. *Ciencia*, 73, 52–59.
- [9] Rimoldi, S., Antonini, M., Gasco, L., Moroni, F., & Terova, G. (2021). Intestinal microbial communities of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) may be improved by feeding a *Hermetia illucens* meal/low-fishmeal diet. *Fish Physiology and Biochemistry*; 47(2):365–380. <https://doi.org/10.1007/s10695-020-00918-1>.
- [10] Smets, R., Verbinnen, B., Van De Voorde, I., Aerts, G., Claes, J., & Van Der Borgh, M. (2020). Sequential Extraction and Characterisation of Lipids, Proteins, and Chitin from Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae, Prepupae, and Pupae. *Waste and Biomass Valorization*, 11(12), 6455–6466. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00924-2>.
- [11] Surendra, K. C., Tomberlin, J. K., van Huis, A., Cammack, J. A., Heckmann, L.-H. L., & Khanal, S. K. (2020). Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae). *Waste Management*, 117, 58-80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>

A close-up photograph of several green leaves, likely from a tree or shrub, covered in numerous small, clear water droplets. The leaves are vibrant green and have a prominent vein structure. The background is dark, making the green leaves and white droplets stand out. The text is overlaid on the upper and lower portions of the image.

# **Humedales: Un ecosistema funcional en el planeta**

**M.C. López Estrada Oliver Rodolfo**

**Dr. García Mondragón David**

**M.C. Suarez García Monserrat**

**Dr. Gallego Alarcón Iván**

**Instituto Interamericano de Tecnología y  
Ciencias del Agua, Universidad Autónoma  
del Estado de México, Toluca, Estado de México**

**Abstract**

Natural and artificial wetlands play an essential role in the global climate; they have characteristics that allow them to improve water quality.

Artificial wetlands function as eco-technologies and have advantages over conventional wastewater treatments, through interaction processes so complex that they were even studied by NASA.

**Keywords:** Wetland, wastewater, water quality

**Introducción**

Los humedales son zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente por mareas, cuyos límites los constituyen, el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional (Hernández *et al.*, 2018).

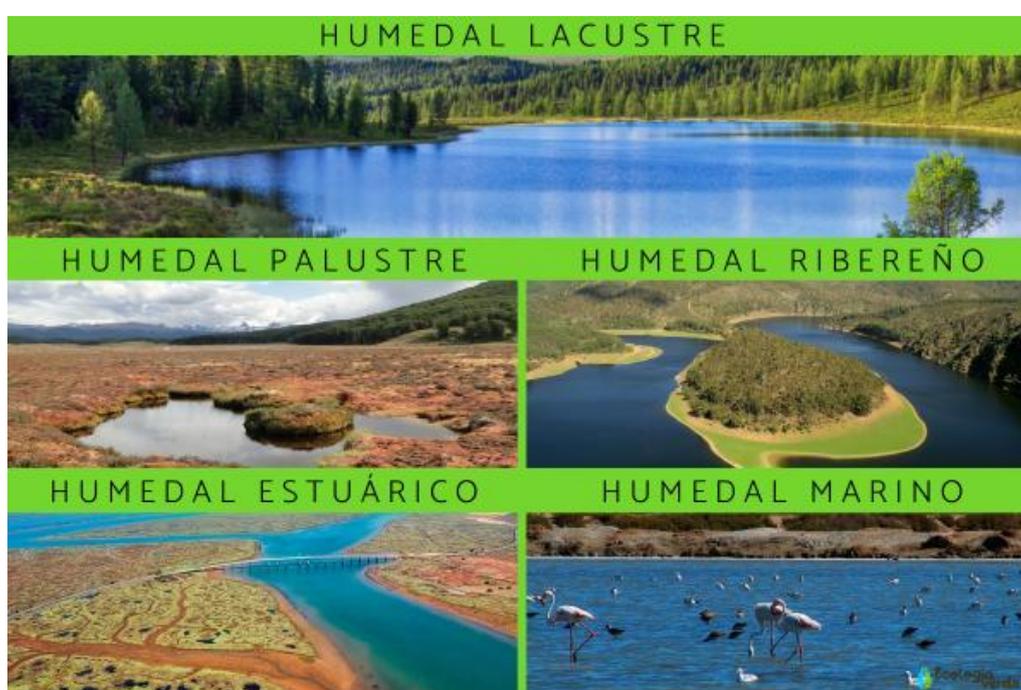


Figura 1

**Tipos de humedales**

Por su naturaleza los humedales se clasifican en naturales: cuyas áreas se encuentran inundadas por aguas dulces o saladas de forma temporal o permanente, con una vegetación típica adaptada para vivir en condiciones de suelo saturado y, los humedales artificiales cuyas características son similares a los naturales con la diferencia de que se encuentran confinados mediante algún tipo de impermeabilización (Alikhani

*et al.*, 2021). Ambos son sistemas biológicos, con mecanismos para la depuración de aguas, donde se combinan procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren por la interacción del agua con, el suelo, las plantas, los microorganismos y la atmósfera, dando lugar a la aparición de procesos de sedimentación, filtración, adsorción, degradación biológica, fotosíntesis y toma de nutrientes por parte de la vegetación (Ramírez, 2019).

### Rol de los humedales en el planeta

Su importancia ecológica en los ecosistemas es manifiesta por sus funciones hidrológicas, biogeoquímicas y biológicas. Son grandes depuradores naturales, ayudan a reducir los riesgos por desastres, impidiendo inundaciones, por su capacidad intrínseca de absorber grandes cantidades de agua, además, otorgan lugares para esparcimiento y mejoran la calidad del aire.

Son los ecosistemas con mayor productividad a nivel mundial y aunque éstos se encuentran localizados en sitios con condiciones ambientales muy contrastantes, a escala global, su productividad primaria (producción de materia orgánica a partir de energía solar) siempre es alta. Por ejemplo, el papiro (*Cyperus papyrus*) humedales de Kenya, puede generar una producción primaria de hasta del doble de lo

que producen las mejores pasturas de Europa; algo similar ocurre con los manglares, cuya productividad primaria neta es similar a la de los sistemas agrícolas intensivos de los países occidentales (Dazzini *et al.*, 2021). Además, son sitios con alta biodiversidad de flora y fauna, por la abundancia de agua, alimento y refugio, son hábitats que mantienen ciclos de vida y preservan la genética de las especies, permitiendo la continuidad de las funciones vitales de los ecosistemas (Díaz *et al.*, 2018).

La oferta de recursos que son aprovechados por las especies que habitan estos ecosistemas son base de cadenas alimenticias de ecosistemas vecinos (Dazzini *et al.*, 2021); y desempeñan un papel elemental en el clima mundial por la captación de  $CO_2$  (Ramírez, 2022).



Figura 2

### Sitios RAMSAR

En 1971 en la Ciudad de Ramsar, Irán; 18 naciones impulsaron en un tratado intergubernamental que sirvió de marco para la acción nacional y la cooperación internacional, en pro

de la conservación y uso racional de los humedales y sus recursos, que fue denominada Convención Ramsar, desde su creación hasta la actualidad se han sumado 169 países y se han inscrito 2,242 humedales, los cuales se les asigna

la categoría de sitios Ramsar, cubriendo una superficie total de 215, 253,189 hectáreas a nivel mundial equivalente al 38,9% de la superficie terrestre (Hernández *et al.*, 2018).

En México el 16.8% de su territorio está constituido por humedales (0.6% del mundo), esto equivale a una extensión de 3,318,500 hectáreas ubicadas en superficie continental y el perímetro litoral. Actualmente tiene un registro de 144 humedales como sitios Ramsar, constituyéndose en uno de los países con mayor número a nivel mundial (Hernández *et al.*, 2018).

### **Humedales, una alternativa para mejorar la calidad del agua**

El mejoramiento de la calidad del agua es uno de los servicios ecosistémicos que proveen los humedales más importantes, son capaces de eliminar o reducir hasta un 80% de compuestos

orgánicos (nitrogenados y fosfatos) contenidos en las descargas superficiales y subterráneas de las aguas residuales, de uso agrícola, industrial y municipal; mejoran la calidad de agua para consumo humano al evitar o disminuir la toxicidad y, además disminuyen el riesgo de eutrofización en los ecosistemas (Díaz *et al.*, 2018).

La vegetación en un humedal tiene un papel importante en la química del agua, al remover los nutrientes e incorporarlos en sus tejidos, sirven como soporte para microorganismos, airean el sustrato, permitiendo tener gradientes de óxido-reducción anaerobios y aerobios. Los gradientes de óxido-reducción en los humedales son sumamente importantes para los procesos biogeoquímicos que ocurren en ellos y que mayoritariamente son responsables de la eliminación de contaminantes (Solano, 2020).



Figura 3

Entre los productos de mayor relevancia obtenidos por los procesos químicos son formas inorgánicas de fósforo y nitrógeno, son nutrientes esenciales para el desarrollo de organismo vivos, estos pueden ser limitantes de la producción primaria en los ecosistemas acuáticos y las formas del inorgánicas del nitrógeno están disponibles en el agua y son utilizadas por el fitoplancton y otros productores primarios. La concentración y tipos de reacción de estos elementos y compuestos son críticos para los procesos celulares como el crecimiento de las plantas y el control de la productividad primaria del sistema (Ramírez, 2019).

Los humedales naturales y artificiales tienen un conjunto de características o propiedades inherentes, pero realizan funciones similares ambos sistemas (Alikhani *et al.*, 2021), esto implica procesos biológicos, físicos y químicos, como la filtración, sedimentación, adsorción, volatilización, fitoacumulación y la actividad microbiana (Khan *et al.*, 2022), estos procesos se utilizan para controlar la contaminación en el medio ambiente.

Finalmente, los humedales artificiales al estar diseñados en un entorno semicontrolado, tienen resultados alentadores como ecotecnologías; realizan procesos biogeoquímicos aeróbicos y anaeróbicos que regulan la retención y eliminación de contaminantes (Hernández *et al.*, 2018).

Por ser sistemas específicos para el tratamiento de aguas residuales, aumentan las capacidades depuradoras de la vegetación y con ello la eficacia del sistema, al optimizar los procesos físicos, químicos y biológicos (Arteaga *et al.*, 2019), que remueven los contaminantes presentes en las

aguas residuales, son un tratamiento eficaz de aguas residuales urbanas, industriales, agrícolas, pecuarias o efluentes mineros, aguas contaminadas con petróleo y municipales, por ejemplo, en comunidades pequeñas, de hasta 1000 habitantes, y en áreas mayores de hasta 2000 habitantes (Pérez *et al.*, 2022).

Incluso tienen ventajas técnicas, económicas, sociales y estéticas sobre tratamientos convencionales de aguas residuales, ya que permiten lograr una buena calidad del agua tratada conforme a la normatividad vigente. Además, los costos de implementación, operación y mantenimiento, en comparación con los sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales son menores, sus requerimientos energéticos de operación son mínimos, dado que la conducción del agua a los humedales es prácticamente por gravedad (Arteaga *et al.*, 2019).

Depuran nutrientes con una efectividad de remoción del 96% sólidos suspendidos totales (SST), 96% demanda biológica de oxígeno (DBO), 87% demanda química de oxígeno (DQO), y 30% para fósforo total. Son la mejor mitigación de pesticidas y fertilizantes, contienen en su mayoría fosfato que puede infiltrarse aguas subterráneas provenientes de la escorrentía de suelos agrícolas, dicho elemento es importante para los ecosistemas, pero en grandes cantidades pueden conducir a la eutrofización de cuerpos de agua (Pérez *et al.*, 2022). La remoción se realiza de forma biológica y fisicoquímica o bien interacción planta-nutriente, para lograr un proceso de purificación del cuerpo de agua eutrófico, absorben nutrientes por la interacción plantas y microbios, es un proceso complejo, que incluye una serie de reacciones químicas y biológicas, incluso fue estudiada por la NASA

desarrolló su propio sistema empleando microorganismos anaerobios y plantas emergentes (Arteaga *et al.*, 2019).

## Referencias

- [1] Arteaga-Cortez, V., Quevedo-Nolasco, A., Valle-Paniagua, D., Castro-Popoca, M., Bravo-Vinaja, Á., y Ramírez-Zierold, J. "Estado del arte: Una revisión actual de los mecanismos que hacen los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo". *Tecnología y ciencias del agua*. 10 [5], pp. 319-343, 2019.
- [2] Díaz Carrión, I., Sedas Larios, E., y Burguillo Cuesta, M. Servicios ecosistémicos en humedales. En I. Díaz Carrión y M. Burguillo Cuesta (Eds.). *Servicios ecosistémicos en humedales, SEDEMA, 2018*, pp. 17-50.
- [3] Dazzini Langdon, M. y Navarrete Zambrano, H. *Bosques azules: Humedales en riesgo*. Una visión latinoamericana, 2018, pp. 96-110.
- [4] Hernández, M. y Moreno-Casasola, P. Almacenes y flujos de carbono en humedales de agua dulce en México, *Madera y Bosques*. 24, 2018.
- [5] Khan S., Ponce, P., Yu, Z., Golpira, H. y Mathew, M. Environmental technology and wastewater treatment: Strategies to achieve environmental sustainability. *Chemosphere*, 286 [131532], 2022.
- [6] Pérez, Y., Cortés, D., y Haza, U. Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas*. 31 [1], pp. 2279-2279. 2022.
- [7] Ramírez, D., Lértora, G., Vargas, R., y Aponte, H. Efecto de los incendios en la cobertura vegetal, almacenamiento de carbono y biomasa vegetal de un humedal costero. *Revista de Biología Tropical*. 70 [1], pp. 348-362, 2022.
- [8] Ramírez, A. *Funcionamiento ambiental de humedales fluviales tropicales: Condiciones de nivel del agua e influencia en factores fisicoquímicos del agua*. [Tesis de doctorado, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco], 2019.
- [9] Solano, V. *Tratamiento de agua residual azucarera utilizando un sistema híbrido (Digestión anaerobia-humedal construido)*. [Tesis de maestría, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz, México], 2020.



**Hidrólisis ácida. Método  
convencional para la  
revalorización de biomasa  
lignocelulósica**

**Alejandro Sánchez Mesa**  
Tecnológico de Antioquia Iu, Colombia.

**Dr. Julio César Gómora Hernandez**  
Tecnológico de Estudios Superiores de  
Tianguistenco, México.

**Dra. Leidy Astrid Hoyos**  
Tecnológico de Antioquia Iu, Colombia

**Abstract**

Lignocellulosic biomass is the most abundant natural source around the world, from which a wide kind of chemicals of commercial interest can be produced. Acid hydrolysis is a chemical method commonly employed to transform lignocelluloses into value-add chemicals such as easily fermentable sugars; mainly glucose, xylose and arabinose, and cellulose derivatives by either single or complex processes. In this paper, a general description of acid hydrolysis technology as conventional pretreatment method or as direct technique to produce monomeric sugars, as well as its role on lignocelluloses revalorization, mathematical models and the main chemical compounds produced by acid hydrolysis of lignocellulosic biomass are presented and described.

**Keywords:** Lignocellulose, chemical treatment, revalorization, natural sources.

**Resumen**

La biomasa lignocelulósica es el recurso natural más abundante del planeta, la cual puede aprovecharse para la producción de compuestos químicos de interés comercial. La hidrólisis ácida es un método químico comúnmente utilizado para transformar dicha biomasa en compuestos de valor agregado como azúcares fácilmente fermentables; glucosa, xilosa y arabinosa principalmente, y derivados de celulosa en procesos de una o más etapas. En el presente trabajo se describe un panorama general de la hidrólisis ácida como método convencional de pretratamiento y para la extracción de azúcares, así como el papel que juega durante el proceso de revalorización de lignocelulosa, además, se resume la importancia, modelos matemáticos y compuestos químicos principalmente

producidos mediante la hidrólisis ácida de lignocelulosas.

**Palabras clave:** Lignocelulosa, tratamiento químico, revalorización, recursos naturales.

**Introducción**

Uno de los residuos mayormente generados en el mundo son los lignocelulósicos, producidos a través de diferentes actividades como la agricultura, industria agroalimenticia, actividades forestales y domésticas (1). Se ha estimado que la generación de estos residuos excede los 200 billones de toneladas anuales en base seca, por lo cual representan una fuente económica, renovable y potencial para su transformación en compuestos químicos de interés comercial (2). Sin embargo, la estructura química de la biomasa lignocelulósica le otorga una alta resistencia a la descomposición natural y a su transformación química, por lo cual es necesario someterla a tratamientos que incrementan la eficiencia de los procesos posteriores. Uno de los tratamientos más utilizados es la hidrólisis ácida, la cual consiste en mezclar un ácido orgánico o inorgánico con la biomasa lignocelulósica para alterar su estructura natural, aumentar su área superficial y modificar su estructura química. La hidrólisis ácida suele utilizarse como un método para la extracción tanto de azúcares fácilmente fermentables como de celulosa cristalina. En el presente trabajo se describe un panorama general de la biomasa lignocelulósica y de su revalorización mediante la técnica de hidrólisis ácida. Además, se describen de manera general los modelos matemáticos aplicados a la hidrólisis ácida, su importancia, aplicación y los principales productos obtenidos durante la reacción.

## Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica comprende una gran variedad de recursos tales como los forestales, agrícolas, agroindustriales y todo tipo de plantas. Los residuos generados en estos sectores se conocen como residuos lignocelulósicos (Figura 1), los cuales se producen en abundancia alrededor del mundo y usualmente no son revalorizados ni aprovechados. Debido a su excesiva generación y a la problemática de la contaminación ambiental, en años recientes se ha propuesto el término *economía circular* que tiene como premisa la nula generación de residuos y el máximo aprovechamiento de los recursos naturales para su transformación en compuestos de interés comercial, esto sugiere un alto potencial económico y productivo de los residuos lignocelulósicos.

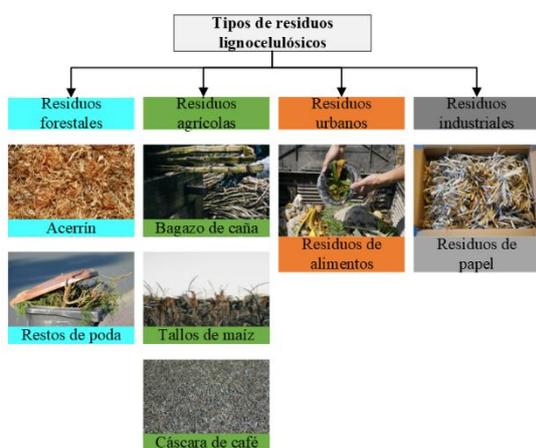


Figura 1: Ejemplos de residuos lignocelulósicos y su origen.

Los residuos lignocelulósicos cuando se disponen de manera errónea propician diferentes problemáticas ambientales y sanitarias tales como la contaminación del agua, erosión del suelo y la emisión de gases de efecto invernadero durante su descomposición natural (3). Sin embargo, con el creciente conocimiento científico sobre este tipo de residuos, así

como su amplia distribución, abundancia y accesibilidad, se han considerado como materia prima para la producción de diferentes materiales tales como papel, fibras, combustibles, químicos, fármacos, fertilizantes, entre otros (4).

La lignocelulosa se compone principalmente de tres biopolímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina. Algunos compuestos secundarios tales como aceites, cenizas, almidón, pectinas y gomas también se encuentran presentes, sin embargo, su composición depende de la naturaleza y del tipo de biomasa.

La celulosa es un homopolímero compuesto por unidades monoméricas de glucosa que forman largas cadenas lineales, las moléculas de glucosa se mantienen unidas entre sí a través de enlaces  $\beta$ 1-4 glucosídicos. La celulosa es un material inodoro e incoloro que es insoluble en agua con fórmula química:  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . La Figura 2 muestra la estructura molecular de la celulosa.

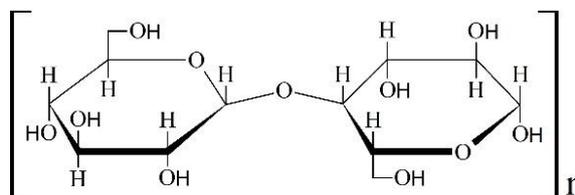


Figura 2: Estructura molecular de la celulosa.

La celulosa es el biopolímero más abundante en el planeta, su alta biodegradabilidad y sus propiedades mecánicas despiertan interés para su aplicación en formulación de pinturas, cosméticos, bioplásticos y excipientes para fármacos. Además, aumenta el carácter biodegradable de los materiales, disminuyen su impacto ambiental y biodegradabilidad.

La hemicelulosa, a diferencia de la celulosa es un heteropolímero con una

estructura ramificada (Figura 3), se compone de diferentes azúcares de 5 o 6 carbonos como arabinosa, galactosa, manosa, glucosa y principalmente xilosa. En las plantas tiene la función de crear una unión entre la lignina y la celulosa (4). Este heteropolisacárido es fácilmente hidrolizable por medios biológicos y químicos, además de tener un menor grado de polimerización y de cristalinidad que la celulosa.

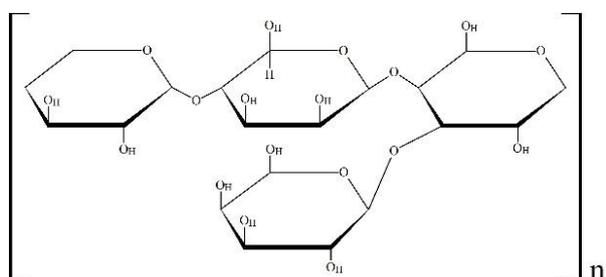


Figura 3: Estructura molecular de la hemicelulosa.

El segundo biopolímero más abundante en la naturaleza es la lignina, la cual se caracteriza por poseer una estructura basada en 3 unidades aromáticas fenólicas, estas son los alcoholes: cumarílico, coniferílico y sinapílico (Figura 4). La composición de la lignina varía según el tipo de fuente y de las condiciones ambientales en las cuales se desarrolla la planta. Este biopolímero es de interés industrial ya que es precursor para la obtención de compuestos poliméricos, adhesivos, floculantes, antioxidantes, fibras, materia prima en el sector de la energía, entre otras aplicaciones (5). La lignina brinda rigidez a las plantas para su soporte, al igual que resistencia a la presión hídrica, posee un color oscuro que protege a la planta de los rayos UV.

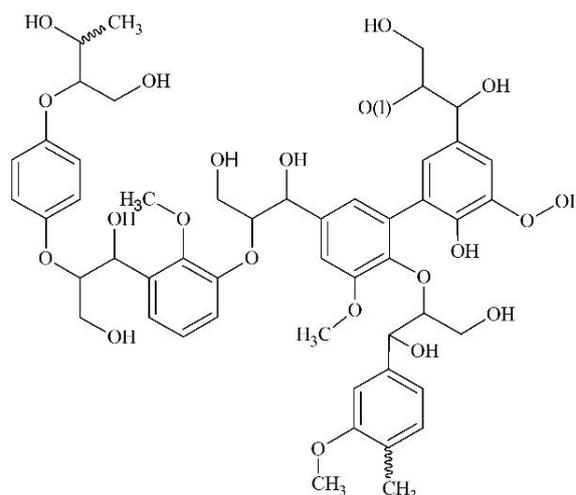


Figura 4: Estructura molecular de la lignina.

La investigación sobre el aprovechamiento de lignocelulosas y la necesidad de migrar a métodos de producción sostenibles y que acerquen a las industrias al modelo de economía circular, han proporcionado las vías para que sectores como el farmacéutico, agrícola, energético, entre otros, puedan obtener diversos productos a partir de los residuos lignocelulósicos, entre ellos se destacan los biopolímeros naturales y los derivados de celulosa. Otros productos que pueden ser producidos son los ácidos orgánicos de bajo peso molecular como el acético, propiónico, láctico y butírico, producidos mediante tratamientos biológicos, así como fertilizantes y biocombustibles como el biohidrógeno y biometano.

La limitante más importante que se tiene durante la revalorización de la lignocelulosa se atribuye a su alto contenido de lignina y cristalinidad de la celulosa que le confiere una alta estabilidad y resistencia mecánica y a los ataques físicos, químicos y biológicos, lo que hace indispensable el uso de pretratamientos que mejoren el aprovechamiento de la lignocelulosa y brinden mayores rendimientos en cuanto a la producción posterior de químicos (5).

## Pretratamiento de la biomasa lignocelulósica

La descomposición de la biomasa lignocelulósica es compleja y difícil, y varía dependiendo del origen de la biomasa, debido a esto, el pretratamiento se convierte en un paso indispensable, que busca alterar la estructura fisicoquímica y las propiedades de la lignocelulosa para obtener componentes de interés industrial en etapas de proceso posteriores. El principal objetivo de los pretratamientos es corromper la matriz lignocelulósica, incrementar el área superficial, remover de manera parcial o total uno o más de los biopolímeros, alterar la estructura química, cristalinidad y grado de polimerización de la celulosa y aumentar el aprovechamiento posterior de la lignocelulosa (6). Los pretratamientos se clasifican en físicos, químicos, fisicoquímicos y biológicos (Figura 5).

Los tratamientos físicos tienen como objetivo disminuir el tamaño de partícula a través de procesos mecánicos y de irradiación. Los tratamientos químicos utilizan compuestos tales como ácidos, bases, líquidos iónicos, solventes orgánicos o agentes oxidantes para alterar la estructura de la matriz lignocelulósica y solubilizar de manera parcial o total a uno o más de los biopolímeros. El tratamiento ácido es conocido por su alta eficiencia para disolver a la hemicelulosa y de manera parcial a la celulosa, mientras que el uso de compuestos alcalinos y oxidantes tiene como objetivo la eliminación de la lignina. Algunos otros tratamientos químicos pueden mejorar la afinidad química de los biopolímeros para aplicaciones posteriores.

Los tratamientos fisicoquímicos al igual que los tratamientos químicos, buscan modificar las propiedades de la

matriz lignocelulósica para aumentar su reactividad y aprovechamiento. Los principales tratamientos encontrados en esta clasificación son la explosión de vapor catalizada, explosión con amonio, explosión de vapor y tratamientos a condiciones críticas. Por otro lado, los tratamientos biológicos hacen uso de microorganismos como bacterias y hongos, así como enzimas características que buscan la eliminación selectiva de un componente de la lignocelulosa. Los hongos de podredumbre café o blanca son utilizados para la eliminación de la lignina, mientras que las bacterias productoras de enzimas celulasas se usan para eliminar a la celulosa (5).



Figura 5: Diferentes tipos de pretratamiento y su clasificación.

Uno de los métodos de pretratamiento más utilizados es la hidrólisis ácida, debido a su capacidad para alterar la matriz lignocelulósica y para producir azúcares fácilmente fermentables a partir de la hemicelulosa y celulosa. Este método ha sido utilizado desde hace varias décadas y su uso persiste aún en la actualidad.

### Hidrólisis ácida

La hidrólisis ácida es un proceso químico que puede utilizarse como pretratamiento para alterar la estructura química de la biomasa lignocelulósica o como método directo para la producción de azúcares fácilmente fermentables a partir de la

celulosa y hemicelulosa. Este método es ampliamente utilizado debido a su bajo costo y alta efectividad. La hidrólisis ácida se basa en el uso de diferentes ácidos como el sulfúrico, fosfórico, nítrico, acético, fluorhídrico, clorhídrico, entre otros, a diferentes concentraciones, temperaturas y tiempos de reacción. La hidrólisis ácida comúnmente puede realizarse de dos formas distintas: la primera a altas temperaturas y bajas concentraciones de ácido, y la segunda a bajas temperaturas y altas concentraciones de ácido, siendo la primera opción la más utilizada debido a su capacidad para extraer azúcares hemicelulósicos en tiempos de reacción cortos, sin embargo, su principal desventaja es la formación de compuestos inhibidores del crecimiento microbiano como los aldehídos furfural e hidroxi-metil furfural.

El proceso a altas concentraciones de ácido tiene como principal objetivo romper la estructura natural de la celulosa sin generar aldehídos inhibidores. Cabe resaltar que el uso de altas concentraciones de ácido puede generar problemas de corrosión, en tanto que la hidrólisis llevada a cabo a bajas concentraciones tiene la ventaja de usar menos reactivo y ser menos corrosiva y tóxica.

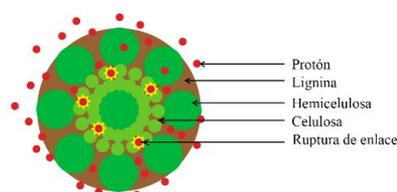


Figura 6: Difusión de protones hacia la celulosa, previa a la producción de azúcares

La reacción de hidrólisis ácida de lignocelulosa comienza con la difusión de los protones del ácido hacia la matriz

lignocelulósica (Figura 6), en donde se unen con el oxígeno glucosídico de la celulosa y hemicelulosa y rompen el enlace  $\beta$  1 $\rightarrow$ 4 que mantiene unidas a las moléculas de glucosa, generando de esta forma 1 molécula de agua y 2 moléculas de azúcar (6).

Durante la hidrólisis ácida las cadenas de polisacáridos de longitudes considerables, se transforman en oligosacáridos con extensiones variables de 2 a 10 unidades simples de azúcar, y finalmente estos oligosacáridos se convierten en azúcares monoméricos disueltos en fase líquida, conocida como hidrolizado.

La eficiencia de la hidrólisis ácida depende de diferentes factores como la temperatura, el tiempo de reacción y la concentración del ácido; los cuales definen la severidad del tratamiento ácido a través del Factor de Severidad Combinado (FSC). Este factor permite conocer el efecto de las condiciones de hidrólisis sobre la producción y degradación de azúcares, así como sobre los cambios fisicoquímicos que sufre la matriz lignocelulósica (7).

Matemáticamente el FSC se define tal y como se muestra en la Ecuación 1.

$$FSC = \log \left[ t \cdot \frac{T - T_r}{e^{14,75}} \right] \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde  $t$  es el tiempo de contacto en minutos,  $T$  y  $T_r$  la temperatura de reacción y de referencia (100 °C), respectivamente y 14.75 un coeficiente constante. El FSC se basa en el Factor de Severidad (FS) utilizado para determinar la severidad de la explosión de vapor catalizada y no catalizada, en donde no interviene la acción de un ácido.

### Modelos cinéticos utilizados para estudiar la hidrólisis ácida

La idea de todos los procesos es que estos puedan ser escalados para su implementación a nivel industrial. El estudio cinético permite identificar las condiciones óptimas a las cuales debe operar un reactor para obtener la mayor eficiencia. A pesar de que la hidrólisis ácida de biomasa lignocelulósica es una reacción heterogénea que se lleva a cabo entre la biomasa sólida y la solución ácida líquida, la mayoría de los modelos cinéticos considera que esta reacción es de primer orden y pseudo-homogénea, es decir, que la biomasa se solubiliza antes de comenzar la reacción.

Para realizar un estudio cinético de la hidrólisis ácida de lignocelulosa, se deben obtener datos experimentales de la producción de azúcares y graficarlos en función del tiempo de reacción, para cada una de las temperaturas y concentraciones de ácido. Posteriormente se utilizan modelos matemáticos para ajustar los datos obtenidos y conocer la constante de velocidad de producción de azúcares. Gracias al estudio cinético, se puede estimar la producción de azúcares a condiciones no evaluadas de manera experimental y determinar las condiciones de operación que favorecen la producción de azúcares favoreciendo así a la escalabilidad y economía del proceso.

A lo largo de la historia, se han desarrollado diversos modelos cinéticos, dentro de los más empelados se encuentra el desarrollado por Saeman en 1945, el modelo bifásico, que es una versión modificada del anterior y el modelo de primer orden.

#### Modelo de Saeman

Este modelo fue utilizado por primera vez para estudiar la hidrólisis con ácido sulfúrico de la madera, se describe

cómo un proceso de dos reacciones secuenciales e irreversibles de primer orden. La primera reacción se asocia a la producción de azúcares y la segunda a su degradación, estos procesos están asociados a las constantes cinéticas  $k_1$  y  $k_2$ , respectivamente (8). Debido a su simpleza, este modelo se ha utilizado ampliamente utilizando diversos tipos de biomasa. La Figura 7 muestra un esquema general del modelo de Saeman.

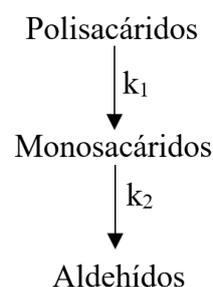


Figura 7: Esquema general del modelo cinético de Saeman

El modelo cinético de Saeman se muestra en la ecuación 2.

$$M = \frac{P_0 \cdot k_1}{k_2 - k_1} \left[ e^{-k_1 \cdot t} - e^{-k_2 \cdot t} \right] \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde  $M$  es la concentración de azúcares a los diferentes tiempos  $t$ ,  $P_0$  es la concentración inicial de polisacáridos y las constantes  $k_1$  y  $k_2$  tienen el significado mostrado en la Figura 6.

#### Modelo de primer orden

El modelo de primer orden es el más sencillo, considera únicamente la fase de producción de azúcares e ignora su degradación, este modelo establece que la velocidad de producción de azúcares en la reacción depende de la concentración de inicial de polisacáridos ( $C_0$ ) y que la reacción de hidrólisis sigue un modelo de primer orden. Además, para que este modelo pueda ser utilizado la producción de azúcares no debe alcanzar la fase de deshidratación

térmica denotada como  $k_2$  en el modelo de Saeman. En este modelo solo se obtiene una constante de velocidad ( $k$ ) tal y como se observa en la ecuación 3 (9).

$$C = C_0 \cdot e^{k \cdot t} \quad (\text{Ec. 3})$$

### Modelo bifásico

El modelo bifásico es una adaptación del modelo de Saeman, con la particularidad de que este modelo considera dos constantes para la producción de azúcares; rápidamente ( $k_f$ ) y lentamente hidrolizable ( $k_s$ ), la constante de velocidad de la degradación de azúcares se representa igual que en el modelo de Saeman ( $k_2$ ). Este modelo sugiere que una parte de la biomasa lignocelulósica se hidroliza fácilmente en medios ácidos mientras que otra parte persiste durante la reacción. En general la fase rápidamente hidrolizable se atribuye a la presencia de la hemicelulosa (10). La Figura 8 muestra un esquema simplificado del modelo bifásico, mientras que su modelo matemático se presenta en la ecuación 4.

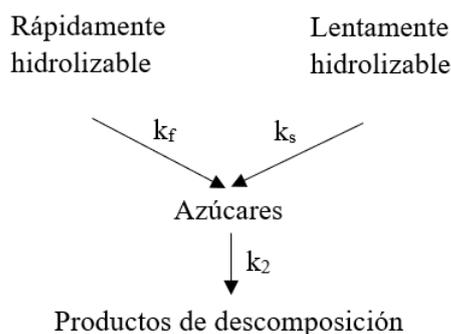


Figura 8: Esquema general del modelo cinético bifásico

$$M = \frac{\alpha \cdot P_0 \cdot k_f}{k_2 - k_f} \left[ e^{-k_f \cdot t} - e^{-k_2 \cdot t} \right] + \frac{(1 - \alpha) \cdot P_0 \cdot k_s}{k_2 - k_s} \left[ e^{-k_s \cdot t} - e^{-k_2 \cdot t} \right] \quad (\text{Ec. 4})$$

En donde  $M$ ,  $P_0$ ,  $t$  y  $k_2$  tienen el

mismo significado al descrito en párrafos anteriores, mientras que  $\alpha$  es la fracción rápidamente hidrolizable de la lignocelulosa.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los modelos cinéticos

Modelo	Ventajas	Desventajas
Saeman	Ampliamente usado. Aplica para diversos materiales.	No aplica para todo tipo de biomasa.
Primer orden	Modelo simple y práctico.	No considera la cinética de la producción y degradación de azúcares en conjunto.
Bifásico	Mejor ajuste a biomasas con alto contenido de hemicelulosa.	Mayor complejidad. No aplica para todo tipo de biomasa.

### Productos producidos durante la hidrólisis ácida de lignocelulosa

Existen diferentes productos que pueden obtenerse durante la hidrólisis ácida de biomasa lignocelulósica, entre los que destacan los azúcares monoméricos, aldehídos, la lignina ácido soluble, celulosa purificada y sus derivados (5), así como biocombustibles (Figura 9).

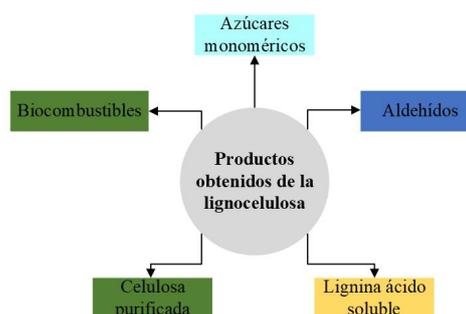


Figura 9: Productos obtenidos a partir de la lignocelulosa.

### Azúcares fermentables

Los azúcares fácilmente fermentables consisten de unidades individuales de azúcares de 5 y de 6 carbonos como la glucosa, xilosa, arabinosa, manosa y galactosa, que provienen de la celulosa

y hemicelulosa durante su hidrólisis ya sea química o biológica. Por si mismos estos azúcares no tienen una aplicación directa, sin embargo, son utilizados como materia prima para la producción de biocombustibles, bioplásticos y alcoholes mediante procesos biotecnológicos que emplean el metabolismo de bacterias, hongos y otro tipo de microorganismos.

En el sector de la energía, los azúcares son usados como fuente de carbono por los microorganismos productores de hidrógeno, metano, etanol y electricidad. Por otro lado, también son usados para la fabricación de biopolímeros, químicos de base biológica con carácter biodegradable y polialcoholes (7).

### **Lignina**

La lignina ácido soluble se disuelve durante la hidrólisis ácida de lignocelulosa y se puede recuperar basificando el pH del hidrolizado. La lignina tiene diversas aplicaciones en diferentes sectores, por ejemplo, se ha utilizado como fertilizante y plaguicida en los campos de cultivo, como precursor en el sector de la energía, dispersante en la industria química, floculante para el tratamiento de aguas y como electrodo en celdas electroquímicas.

A pesar de que el objetivo principal de la hidrólisis ácida es atacar a los polisacáridos, la lignina también se disuelve en menor proporción por lo que puede ser considerada como un producto secundario obtenido durante la hidrólisis ácida de lignocelulosas (3).

### **Celulosa y sus derivados**

Además de su alta biodegradabilidad, la celulosa tiene propiedades naturales interesantes que la hacen un candidato ideal en múltiples aplicaciones. La celulosa purificada durante la hidrólisis ácida se utiliza para la fabricación de películas permeables al

oxígeno, polímeros biodegradables, como sustituto del algodón en la industria textil y para el mejoramiento de emulsiones y de propiedades reológicas.

El principal derivado de la celulosa purificada es la celulosa microcristalina. Este material es de color blanco, inodoro y químicamente estable que se utiliza en diferentes sectores industriales. Generalmente, se produce a partir de un proceso secuencial compuesto por una hidrólisis alcalina seguida de una hidrólisis ácida que tiene como finalidad no solo remover a la hemicelulosa y a la lignina ácido soluble sino también las impurezas que pudieran estar presentes como oxalatos e iones metálicos.

Las nanofibras y nanocristales son otro tipo de derivados celulosa que se producen cuando la severidad del tratamiento ácido es mayor. Estos materiales son utilizados como mejoradores de propiedades reológicas en emulsiones y pinturas, como adsorbentes para la remoción de contaminantes en agua y para la fabricación de materiales con capacidad de biodegradación (3).

### **Biocombustibles**

Durante la hidrólisis ácida se produce una fase líquida rica en azúcares monoméricos y un sólido remanente compuesto principalmente por celulosa, que se fermenta para la producción de biocombustibles o se somete a un tratamiento enzimático para la extracción de azúcares celulósicos.

La hidrólisis ácida tiene la capacidad de alterar la estructura fisicoquímica de la lignocelulosa, incrementando su porosidad, área superficial y disminuyendo el grado de polimerización de los polisacáridos. Gracias a esto, la fermentación del sólido remanente

de la hidrólisis es posible utilizando solamente bacterias o en presencia de enzimas que propicien la transformación previa de la celulosa en glucosa. Algunas bacterias como las del género *Clostridium* tienen la capacidad de producir glucosa a partir de la celulosa y aprovecharla para producir hidrógeno como producto de su metabolismo (7).

En años recientes se ha evaluado tanto el hidrolizado como el sólido remanente para la producción de etanol mediante fermentación alcohólica y de corriente eléctrica a través de celdas de combustible bacterianas, lo cual muestra el potencial de la lignocelulosa para su aprovechamiento en el sector de la energía y le importancia que tiene la hidrólisis ácida durante su revalorización.

A pesar de los esfuerzos hechos hasta ahora, aún son necesarias más investigaciones que optimicen las condiciones de hidrólisis y mejoren el aprovechamiento de la biomasa.

### Conclusiones

La hidrólisis ácida es uno de los métodos químicos más utilizados para tratar la biomasa lignocelulósica y mejorar su aprovechamiento. Puede utilizarse como método de pretratamiento para alterar la estructura natural de la lignocelulosa o como método directo para la producción de azúcares.

Los modelos cinéticos aplicados a la hidrólisis ácida consideran que la reacción es pseudo-homogénea y de primer orden. El modelo de Saeman es un modelo simplificado que modela adecuadamente la reacción de producción de azúcares.

Los productos obtenidos a partir de la lignocelulosa son variados y tienen

interés en el sector industrial. Aún se necesita más información para poder optimizar la reacción y el aprovechamiento de la lignocelulosa.

### Referencias

- [1] Millati R, Cahyono RB, Ariyanto T, Azzahrani IN, Putri RU, Taherzadeh MJ. Agricultural, Industrial, Municipal, and Forest Wastes. Elsevier. pp. 1–22, 2019.
- [2] Bilal M, Wang Z, Cui J, Ferreira LFR, Bharagava RN, Iqbal HMN. Environmental impact of lignocellulosic wastes and their effective exploitation as smart carriers – A drive towards greener and eco-friendlier biocatalytic systems. *Sci Total Environ.* 722 [20], pp. 1-14, 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720314169>.
- [3] Mujtaba M, Fernandes Fraceto L, Fazeli M, Mukherjee S, Savassa SM, Araujo De Medeiros G, *et al.* Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: a review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics. *J Clean Prod.* 402, pp. 1-23, 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623009733>.
- [4] Fan L, Tseng, Gharapuray MM, Lee YH. Cellulose Hydrolysis. Springer. 3, pp. 1-203, 1987.
- [5] Batista Meneses D, Montes De Oca-Vásquez G, Vega-Baudrit JR, Rojas-Álvarez M, Corrales-Castillo J, Murillo-Araya LC. Pretreatment methods of lignocellulosic wastes into value-added products: recent advances and possibilities. *Biomass Convers Biorefinery.* 12, pp.

- 547-564, 2020. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-020-00722-0>.
- [6] Mankar AR, Pandey A, Modak A, Pant KK. Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresour Technol.* 334, pp. 1-12, 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421005745>.
- [7] Gómora-Hernández JC, Carreño-de-León MC, Cuellar-Robles F, Flores-Alamo N. Sugar production by dilute acid hydrolysis of oat bagasse with three different acids: kinetics and thermodynamics. *Rev Mex Ing Quím.* 21, pp. 1-20, 2022. URL: <http://rmiq.org/iqfvp/Numbers/V21/No3/IA2822.html>.
- [8] Saeman JF. Kinetics of Wood Saccharification - Hydrolysis of Cellulose and Decomposition of Sugars in Dilute Acid at High Temperature. *Ind Eng Chem.* 37, pp. 43-52, 1945. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie50421a009>.
- [9] Gómora-Hernández J. C., Carreño-de-León M. del C., Flores-Álamo N., Hernández-Berriel, M. del C.; Fernández-Valverde, S. M. Kinetic and thermodynamic study of corncob hydrolysis in phosphoric acid with a low yield of bacterial inhibitors. *Biomass Bioenerg.* 143, pp. 105830, 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953420303640>.
- [10] Tizazu BZ, Moholkar VS. Kinetic and thermodynamic analysis of dilute acid hydrolysis of sugarcane bagasse. *Bioresour Technol.* 250, pp. 197-203, 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417320060>.



**Con azúcar y miel, hasta los  
fármacos saben bien**

**Dr. David O. Tovar Anaya**

**Dr. Eduardo Villarreal Ramírez**

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Odontología, Laboratorio de

Bioingeniería de Tejidos, División de Estudios de

Posgrado e Investigación

**Dr. Rafael A. Zubillaga Luna**

Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa

División de Ciencias Básicas e Ingeniería,

Departamento de Química, Área de

Biofísicoquímica

**Abstract**

The rapid advancement in drug development, driven by cutting-edge technologies such as virtual screening and combinatorial chemistry, has led to the creation of many potent drugs. However, a common issue arises where many of these drugs have low solubility and bioavailability in the body, which can potentially affect their effectiveness. To address this challenge, the development of intelligent drug nanocarriers has become a major focus in scientific research for over half a century. Among the options, using natural nanotransporters like cyclodextrins has emerged as a simple and highly effective solution.

**Keywords:** nanotransporters, cyclodextrins, drugs, inclusion complex

**Palabras clave:** nanotransportadores, ciclodextrinas, fármacos, complejos de inclusión.

Todos hemos experimentado alguna vez el sabor amargo de ciertos jarabes o medicamentos, y hemos deseado que los medicamentos que tomamos para recuperarnos de alguna enfermedad tuvieran un sabor similar a nuestro dulce favorito. Sin embargo, en la actualidad existen azúcares de tamaños nanométricos capaces de transportar fármacos con sabores neutros. Estos nanotransportadores son estructuras diseñadas para transportar y administrar fármacos o biomoléculas, a sitios específicos dentro del cuerpo humano u otros sistemas. Los nanotransportadores pueden proporcionar a los fármacos mayor estabilidad, solubilidad y la capacidad de atravesar las membranas biológicas, mejorando así su biodisponibilidad. Entre estos nanotransportadores, las ciclodextrinas (CD), azúcares

cíclicos, destacan por su capacidad para formar un sistema de molécula huésped y molécula anfitrión, donde las moléculas huésped son atrapadas dentro de la estructura de las moléculas anfitrión, formando un complejo estable. Sistema conocido como complejo de inclusión. Además, las ciclodextrinas no han demostrado toxicidad al ser administradas por la vía oral (Kali, 2024).

Las CD son capaces de transportar y encapsular fármacos en su interior. Los medicamentos transportados por las ciclodextrinas experimentan un aumento en su solubilidad y biodisponibilidad. Asimismo, se ha logrado modificar el tiempo de liberación, resultando en una reducción de los efectos adversos derivados de una administración prolongada y una disminución en la frecuencia de las dosis. Estos beneficios conllevan a una mejora significativa en la eficacia del tratamiento para los pacientes. Adicionalmente, las ciclodextrinas poseen propiedades biodegradables y biocompatibles, lo que significa que son compatibles con el entorno biológico y no generan respuestas inmunes. Además, tienen la capacidad de viajar a través del cuerpo hasta llegar al sitio específico de acción. En consecuencia, el uso de ciclodextrinas como transportadores de fármacos se presenta como una alternativa sumamente prometedora en el desarrollo de sistemas inteligentes para la administración de medicamentos (Kali, 2024, Saokham, 2018).

**¿Qué son las Ciclodextrinas?**

Las ciclodextrinas son compuestos naturales obtenidos por la descomposición enzimática del almidón. Están constituidas por unidades de glucosa dispuestas en forma de anillo. Su forma tridimensional se asemeja una jícara

sin fondo, con un exterior afín al agua (hidrofilico) y un interior capaz de alojar sustancias poco solubles en agua o hidrofóbicas. Las CD más comunes son la  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  que están formadas por 6, 7 y 8 unidades de glucosa respectivamente, cuyas propiedades físicas y químicas se presentan en la Tabla 1. Las CD son capaces de llevar moléculas como pasajeros en

su interior mediante la formación de complejos. La amplia variedad de moléculas que pueden ser transportadas por las ciclodextrinas las coloca en un lugar destacado de interés en diversas industrias permitiendo su uso con éxito en aplicaciones biotecnológicas (Poulson, 2022).



Figura 1: La estructura 3D de las ciclodextrinas se puede representar como una jícara sin fondo.

Propiedades	$\alpha$ -CD	$\beta$ -CD	$\gamma$ -CD
Unidades de glucosa	6	7	8
Masa molecular ( $\text{g mol}^{-1}$ )	972	1135	1297
Diámetro interno (Å)	4.7-5.3	6.0-6.5	7.5-8.3
Diámetro exterior (Å)	14.6	15.4	17.5
Altura del cono (Å)	7.9	7.9	7.9
Solubilidad en $\text{H}_2\text{O}$ a 25 °C (mg/mL)	145	18.5	232

Tabla 1: Propiedades físicas y químicas de las ciclodextrinas.

### Evolución del Conocimiento sobre Ciclodextrinas

Las ciclodextrinas fueron descubiertas de manera accidental por el químico francés Antoine Villiers (1854-1932) en 1891, mientras estudiaba la acción de catalizadores biológicos de carbohidratos en microorganismos

durante la fermentación del almidón de las papas. Villiers observó la formación de unos curiosos cristales a los que llamó "celulosinas". A principios del siglo XX, el químico y bacteriólogo austriaco Franz Schardinger (1853-1920) identificó dos tipos de cristales durante sus investigaciones sobre descomposición

de comida y los llamó Dextrina- $\alpha$  y Dextrina- $\beta$ . Schardinger también aisló la cepa bacteriana (*Bacillus macerans*) responsable de la síntesis química de las dextrinas (Morin-Crini, 2020).

En la década de 1920, el químico suizo Paul Karrer (1889-1971) confirmó los resultados de Schardinger. Obtuvo una mezcla de oligosacáridos provenientes del almidón compuestos por 4 y 6 unidades de glucosa. Karrer sugirió que estos oligosacáridos estaban compuestos de varios componentes y propuso que las dextrinas debieran clasificarse en dos grupos, las  $\alpha$ -dextrinas y las  $\beta$ -dextrinas (Morin-Crini, 2020).

En 1935, el químico alemán Karl Johann Freudenberg (1886-1983) desarrolló una metodología para la obtención y purificación de las ciclodextrinas y en 1936 Freudenberg sugirió que la  $\alpha$ -dextrina y la  $\beta$ -dextrina tenían una estructura cíclica. Más tarde, en 1940, el bioquímico estadounidense Dexter French (1918-1981) propuso que las dextrinas de Schardinger debían ser llamadas cicloamilosaz desarrolló estrategias para su purificación (Morin-Crini, 2020). Freudenberg también identificó y determinó la estructura de una cicloamilosa con más unidades de glucosa, actualmente conocida como  $\gamma$ -ciclodextrina. En 1949, el químico alemán Friedrich Cramer (1923-2003) y Freudenberg establecieron una nueva nomenclatura para nombrar a las dextrinas como ciclodextrinas (CD). Para la década de 1950 ya se conocían las características físicas y químicas básicas de las ciclodextrinas, incluyendo su capacidad para aumentar la solubilidad de fármacos poco solubles y estabilizarlos. En 1953, Freudenberg, Cramer y el químico alemán Hans Plieninger (1914-1984) obtuvieron la primera patente relacionada con

las ciclodextrinas, cubriendo los aspectos más importantes de las posibles aplicaciones de las CD. Demostraron mediante ejemplos que las ciclodextrinas eran capaces de formar un tipo particular de compuestos denominados "complejos de inclusión"(CI), (Morin-Crini, 2020).

Sin embargo, el uso de las ciclodextrinas en aplicaciones biotecnológicas, especialmente en la industria farmacéutica y alimentaria, fue postpuesto durante décadas debido a una conclusión errónea sobre su toxicidad derivada de un ensayo en el que ratas de laboratorio murieron tras incluir pequeñas cantidades de CD en sus dietas.

A finales de los años 1970 cuando en Japón se aprobó el uso de la  $\alpha$ -ciclodextrina ( $\alpha$ -CD) y la  $\beta$ -ciclodextrina ( $\beta$ -CD) como aditivos alimentarios, y el primer producto farmacéutico del mundo, la prostaglandina E<sub>2</sub>/ $\beta$ -ciclodextrina (Prostarmon  $E^{TM}$  comprimidos sublinguales), fue comercializado en Japón. Para 1997, ya existían formulaciones con ciclodextrinas en el mercado europeo y estadounidense (Morin-Crini, 2020). El constante desarrollo de nuevas tecnologías basadas en las ciclodextrinas, 130 años después de su descubrimiento, hace que estas sigan considerándose como excipientes novedosos con potencial inexplorado. En la actualidad, se comercializan en todo el mundo diferentes fármacos en distintos tipos de formulaciones de complejos de ciclodextrina, incluyendo diferentes tipos de comprimidos (convencionales, masticables y sublinguales), cápsulas orales, soluciones parenterales, supositorios, espráis nasales, soluciones de gotas oculares y productos dérmicos (Morin-Crini, 2020, Kali, 2024).



Figura 2: Científicos principales en el desarrollo de la ciencia de las ciclodextrinas.

### Complejos de inclusión

Los CI son un dúo de compuestos químicos. Imagina que tienes dos moléculas, una de ellas es llamada 'anfitrión' y la otra es la 'huésped'. El anfitrión cuenta con una cavidad en la que la molécula huésped se puede alojar perfectamente. Juntos forman lo que llamamos un complejo de inclusión. En su relación el anfitrión protege y alberga a la molécula huésped en su interior. Las CD son ideales como anfitriones de moléculas que presenten una estructura química adecuada para encajar en su cavidad.

La formación de un CI mejora la estabilidad química, la biodisponibilidad,

controlan la velocidad de liberación y reducen la toxicidad de los fármacos (huésped), lo que los hace más efectivos a dosis más bajas. Debido a que no se forman enlaces químicos reales entre el huésped y la CD, se considera a las CD como excipientes y los compuestos resultantes no se consideran nuevas sustancias activas (Cid-Samamed, 2022, Caira 2019).

### Aplicaciones de los compuestos de inclusión

Las ciclodextrinas, como mencionamos antes, son sustancias naturales, pero también hay versiones modificadas químicamente. Ambos tipos tienen la capacidad de alojar una amplia

variedad de moléculas con diferentes características, como compuestos alifáticos, aldehídos, cetonas, alcoholes, ácidos grasos, ácidos orgánicos, compuestos aromáticos y polares, como halógenos, oxiácidos y aminas. Actualmente, las ciclodextrinas son ampliamente utilizadas en numerosos productos de distintas industrias como la farmacéutica, la alimentaria, la química, la agroquímica, la cosmética, entre otras. En particular, en la industria

farmacéutica, las ciclodextrinas ofrecen la posibilidad de mejorar la entrega de fármacos a través de membranas biológicas gracias a la protección que estas brindan a los fármacos. Su bio-adaptabilidad y múltiples funciones les permiten contrarrestar las propiedades no deseadas de las sustancias activas en diversas vías de administración (Poulson, 2022, Cid-Samamed, 2022).

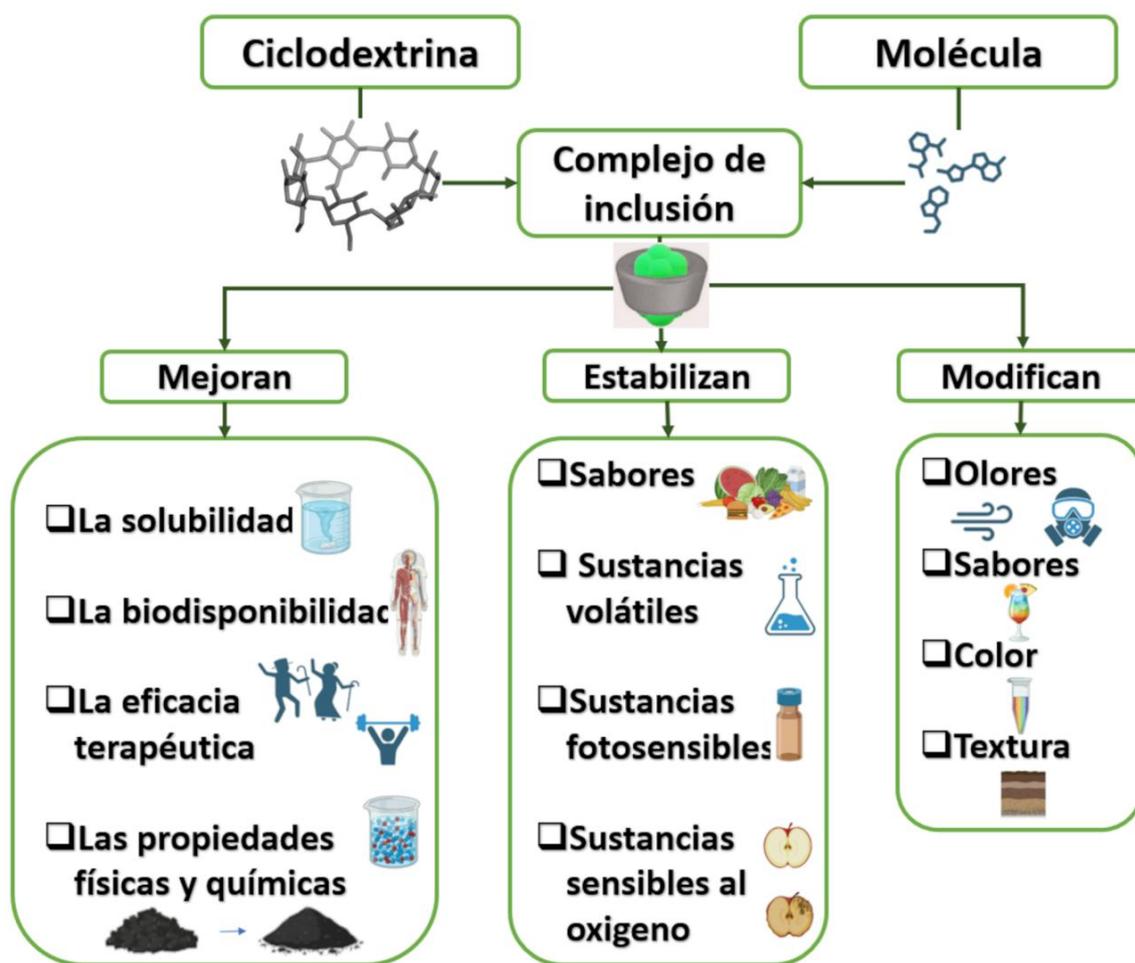


Figura 3: Beneficios de los compuestos de inclusión. (ilustraciones creadas con BioRender.com)

### Complejos de inclusión fármacos-ciclodextrinas

Los fármacos son sustancias químicas utilizadas para tratar y prevenir enfermedades. Hay diferentes tipos de fármacos que se clasifican en diferentes

grupos según sus mecanismos de acción, estructura química, indicaciones terapéuticas y otros criterios. Algunos ejemplos de grupos de fármacos son los analgésicos, antiinflamatorios, antibióticos, antidepresivos, anti-

histamínicos, antipsicóticos y antihipertensivos. En la actualidad, se están llevando a cabo investigaciones en todo el mundo sobre el uso de CD en complejos de inclusión formados con fármacos comerciales o fármacos en desarrollo (Caira, 2029, Kali, 2024).

En este sentido, investigaciones han evidenciado que la formación de CI con analgésicos y CD puede potenciar su eficacia para aliviar el dolor en comparación con la administración tradicional del fármaco. En ensayos clínicos, se confirmó que complejos analgésico-CD no solo aumentan la actividad analgésica y la biodisponibilidad, sino que también reducen los efectos secundarios de medicamentos ampliamente utilizados en la actualidad, como el piroxicam y el diclofenaco. En el caso de los CI formados con antiinflamatorios no esteroideos, que pueden inducir una alta toxicidad, diversos estudios han demostrado que los complejos antiinflamatorio-CD mejoran significativamente la solubilidad, la estabilidad, el sabor, la toxicidad y la biodisponibilidad. Medicamentos como el meloxicam y el flurbiprofeno son ejemplos de medicamentos que aumentaron su eficacia al formar un complejo de inclusión (Miranda, 2021).

Por otro lado, se sabe que los antihistamínicos poseen un sabor amargo que puede resultar desagradable, disminuyendo así la probabilidad de que las personas deseen tomarlos y afectando su eficacia terapéutica. Los estudios de CI formados por antihistamínicos como la difenhidramina, epinastina,

hidroxina, cetirizina, entre otros, junto con ciclodextrinas, han revelado que el amargor de estos fármacos se suprime, sobre todo cuando se utilizan  $\beta$ -CD e hidroxipropil- $\beta$ -CD. En el caso de la loratadina, un antihistamínico para las alergias, que tiene baja solubilidad y absorción deficiente, estudios han demostrado que al formar un CI con una  $\beta$ -CD modificada se puede aumentar su solubilidad y mejorar la absorción (Ono, 2011).

Estudios relacionados con complejos del tipo antibiótico-CD y agentes antibacteriano-CD han demostrado mejoras significativas en la solubilidad, el perfil de liberación, la estabilidad, la permeabilidad de la membrana biológica y la actividad terapéutica. En el caso específico de antibióticos pertenecientes a la categoría de  $\beta$ -lactámicos y tetraciclinas, los CI desempeñan un papel crucial al protegerlos contra la degradación prematura (Boczar, 2022).

Los antipsicóticos a menudo presentan una alta afinidad por las grasas, lo que los hace prácticamente insolubles en agua. Un ejemplo de esta problemática es la baja solubilidad de la quetiapina, lo que lleva a preferir la administración de sales de quetiapina, o la risperidona que presenta nula solubilidad en agua e incompatibilidad con algunos excipientes farmacéuticos como el estearato de magnesio, la lactosa y la celulosa microcristalina. Los científicos que se han interesado en esta problemática sugieren en sus investigaciones que el alojamiento de antipsicóticos en CD permite sortear estas problemáticas, lo que a su vez permite diseñar nuevas formulaciones farmacéuticas con una mejor biodisponibilidad (Ogawa, 2013).

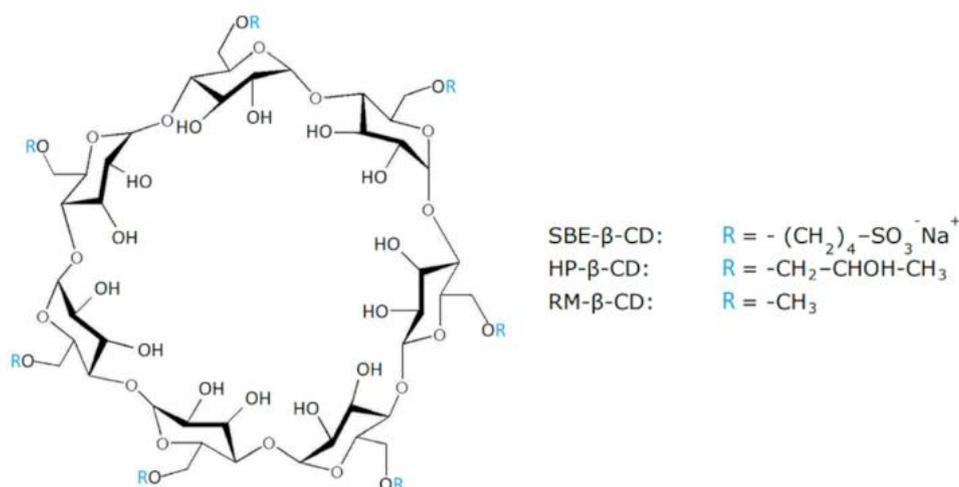


Figura 4: Ciclodextrinas modificadas empleadas actualmente en formulaciones farmacéuticas comerciales.

A pesar de tener muchos medicamentos para tratar la depresión, un alto porcentaje de pacientes no mejoran debido a que los medicamentos actúan lentamente, además, causan efectos secundarios como estreñimiento, diarrea y mareos que a menudo conducen al abandono del tratamiento. Pruebas científicas sugieren que los CI formados con antidepresivos aumenta la eficacia de estos medicamentos. La fluoxetina (Prozac®), el antidepresivo más recetado en todo el mundo ha sido asociada con efectos indeseables como ira, ansiedad, reducción del apetito sexual e insomnio, además de los ya mencionados. Por otro lado, la clomipramina es un antidepresivo que presenta una baja biodisponibilidad. Estudios realizados de complejos Fluoxetina-CD y clomipramina-CD los posicionan como una alternativa prometedora para el desarrollar de una formulación farmacéutica capaz de reducir los efectos adversos y aumentar la eficacia de estos medicamentos (Diniz, 2018).

El uso de ciclodextrinas con fármacos antihipertensivos tiene como objetivo principal mejorar la solubilidad, biodisponibilidad y estabilidad de este tipo de medicamentos. Por ejemplo, la

nifedipina un antihipertensivo utilizado para tratar la hipertensión arterial y la angina de pecho, se caracteriza por tener una baja solubilidad y absorción. Otro medicamento para la presión arterial, la hidroclorotiazida, tiene una baja solubilidad y efectos secundarios molestos como mareos, sequedad de boca, aumento de la sensibilidad al sol, desequilibrios en el contenido corporal de minerales y alteraciones en los niveles de glucosa en sangre. Para abordar este problema, se han estudiado los complejos nifedipina- $\beta$ -CD e hidroclorotiazida-CD, como una estrategia para mejorar la eficacia y reducir los efectos no deseados de estos medicamentos (Kali, 2024).

Los complejos de inclusión fármaco-CD en muchas ocasiones mejoran la eficacia del fármaco al aumentar su biodisponibilidad, especificidad, solubilidad y reducir posibles efectos adversos. De esta manera, los CI fármaco-CD permiten diseñar nuevas presentaciones y formulaciones farmacéuticas mejoradas que permiten la administración de menor dosis de fármaco, enmascarar o eliminar el sabor amargo influyendo en el coste y el riesgo de reacciones adversas y la adherencia terapéutica de los

pacientes. El uso de ciclodextrinas en el transporte de fármacos ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar las propiedades de medicamentos, permitiendo el desarrollo de nuevas formulaciones que potencien su eficacia. Además, los complejos de

inclusión también pueden mejorar la estabilidad de los fármacos durante el almacenamiento y transporte, lo que facilita su distribución y uso en diferentes partes del mundo.



Figura 5: Las ciclodextrinas pueden formar complejo de inclusión con todos los grupos de fármacos.

### Conclusión

Los complejos de inclusión con CDs muestran un gran potencial en diversas industrias, como la alimentaria, la química, la agroquímica y la cosmética. Su capacidad para mejorar las propiedades químicas de los compuestos los convierte en un recurso valioso para el desarrollo de nuevas aplicaciones en múltiples áreas. El uso de ciclodextrinas

en la formulación de los fármacos ha demostrado ser una herramienta valiosa en la industria farmacéutica. Su capacidad para alojar una amplia gama de compuestos, mejorar sus propiedades físicas y químicas ha llevado a que las CD sean consideradas una alternativa para potenciar la eficacia de los fármacos. Aunque nuestro dulce favorito no se convirtió en el mejor medicamento,

ahora tenemos azúcares que nos pueden ayudar a mejorar nuestra salud. Por ello, se espera que la investigación y el uso de ciclodextrinas continúen creciendo en el futuro.

## Referencias

- [1] Boczar D, Michalska K. Cyclodextrin Inclusion Complexes with Antibiotics and Antibacterial Agents as Drug-Delivery Systems-A Pharmaceutical Perspective. *Pharmaceutics*. 2022; 14(7):1389. <https://www.mdpi.com/1999-4923/14/7/1389>
- [2] Caira MR. Cyclodextrin Inclusion of Medicinal Compounds for Enhancement of their Physicochemical and Biopharmaceutical Properties. *Curr Top Med Chem*. 2019;19(25):2357-2370. <https://www.eurekaselect.com/article/101593>
- [3] Cid-Samamed A, Rakmai J, Mejuto JC, Simal-Gandara J, Astray G. Cyclodextrins inclusion complex: Preparation methods, analytical techniques and food industry applications. *Food Chem*. 2022 Aug 1;384:132467. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.132467 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814622004290>
- [4] Diniz TC, Pinto TCC, Menezes PDP, Silva JC, Teles RBA, Ximenes RCC, Guimarães AG, Serafini MR, Araújo AAS, Quintans Júnior LJ, Almeida JRGDS. Cyclodextrins improving the physicochemical and pharmacological properties of antidepressant drugs: a patent review. *Expert Opin Ther Pat*. 2018 Jan;28(1):81-92. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13543776.2017.1384816>
- [5] Kali G, Haddadzadegan S, Bernkop-Schnürch A. Cyclodextrins and derivatives in drug delivery: New developments, relevant clinical trials, and advanced products. *Carbohydr Polym*. 2024 Jan 15;324:121500. doi: 10.1016/j.carbpol.2023.121500. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861723009657?via%3Dihub>
- [6] Miranda GM, Santos VOR, Bessa JR, Teles YCF, Yahouédéhou SCMA, Gonçalves MS, Ribeiro-Filho J. Inclusion Complexes of Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs with Cyclodextrins: A Systematic Review. *Biomolecules*. 2021; 11(3):361. doi.org/10.3390/biom11030361 <https://www.mdpi.com/2218-273X/11/3/361>
- [7] Morin-Crini, N., Lichtfouse, E., & Fourmentin, S. (2020). History of Cyclodextrins. In G. Crini, S. Fourmentin, & E. Lichtfouse (Eds.), *The History of Cyclodextrins* (pp. 1-93). Springer. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-49308-0\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-49308-0_1)
- [8] Ogawa N, Kaga M, Endo T, Nagase H, Furuishi T, Yamamoto H, Kawashima Y, Ueda H. Quetiapine free base complexed with cyclodextrins to improve solubility for parenteral use. *Chem Pharm Bull (Tokyo)*. 2013;61(8):809-15. doi: 10.1248/cpb.c13-00157. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/cpb/61/8/61\\_c13-00157/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/cpb/61/8/61_c13-00157/_article)
- [9] Ono N, Miyamoto Y, Ishiguro T, Motoyama K, Hirayama F, Iohara D, Seo H, Tsuruta S, Arima H, Uekama K. Reduction of bitterness of antihistaminic drugs by complexation with -cyclodextrins. *J*

- Pharm Sci. 2011 May;100(5):1935-43.  
doi: 10.1002/jps.22417. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022354915321687?via%3Dihub>
- [10] Poulson BG, Alsulami QA, Sharfalddin A, El Agammy EF, Mouffouk F, Emwas A-H, Jaremko L, Jaremko M. Cyclodextrins: Structural, Chemical, and Physical Properties, and Applications. *Polysaccharides*. 2022; 3(1):1-31. <https://www.mdpi.com/2673-4176/3/1/1>



