



ISSN: 2448-8461

No 31

Revista Digital del IPN
CIBA Tlaxcala
Mayo - Agosto 2025



FRONTERA BIOTECNOLÓGICA





LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Biotecnología Genómica

Esta línea de investigación se enfoca en el estudio del potencial biotecnológico del genoma de virus, bacterias, hongos y plantas mediante el uso de tecnologías "Ómicas" y biotecnología moderna (ingeniería genética, CRISPR-Cas), para impactar en la resolución de problemáticas de interés global como la mitigación de los efectos del cambio climático, la contaminación ambiental y la salud.

Biotecnología Ambiental

Tiene como objeto el desarrollo, uso y regulación de sistemas biológicos para la remediación de ambientes contaminados (del suelo, aire y agua) y para procesos amigables con el medioambiente (tecnologías verdes y desarrollo sustentable).

Algunos proyectos se enfocan en:

- a) Aprovechamiento de residuos agroindustriales y pecuarios.
- b) Aplicación de microorganismos y sistemas enzimáticos para remoción de contaminantes.
- c) Producción de energías renovables.

Productos Naturales

Se enfoca en el aprovechamiento de metabolitos de origen natural, que sirvan como punto de partida para el desarrollo de alternativas terapéuticas.

Algunos de los proyectos son:

- a) Evaluación de efecto citotóxico para el desarrollo de antitumorales.
- b) Evaluación de efecto antihiper glucémico in vivo.
- c) Identificación de inhibidores enzimáticos (a-glucosidasa, aldosa reductasa, lipasa).



Centro de
Investigación en
Biotecnología
Aplicada
IPN-TLAXCALA

Nanobiotecnología

Comprende el uso y aplicación de elementos nanoestructurados, orgánicos e inorgánicos, para el desarrollo de:

- a) Biosensores y marcadores biológicos.
- b) Nano-encapsulados de uso alimentario.
- c) Nanotrasportadores de fármacos y otras aplicaciones.



Biotecnología Agroalimentaria

Realiza investigación de frontera para contribuir en las demandas de cadena alimentaria en forma integral.

Algunos de los proyectos están enfocados a:

- a) Incrementar rendimientos y valor nutricional de producción agrícola.
- b) Prolongar la vida útil de los alimentos.
- c) Aislar o concentrar principios bioactivos.
- d) Desarrollar nuevos productos.

Bioprocesos

Tiene la misión de establecer el desarrollo y establecimiento de los procesos de producción optimizando las etapas.

Algunos proyectos son:

- a) Producción de enzimas, colorantes, compuestos bioactivos.
- b) Biocatálisis.
- c) Transformación de biomasa vegetal en biocombustibles.
- d) Producción de biológicos para aplicación en salud humana y animal.
- e) Tecnología de biopreservación.



Directorio Institucional



Arturo Reyes Sandoval
Director General

Ismael Jaidar Monter
Secretario General

María Isabel Rojas Ruíz
Secretario Académico

Martha Leticia Vázquez González
Secretaria de Investigación y Posgrado

Yessica Gasca Castillo
Secretaria de Innovación e Integración Social

Marco Antonio Sosa Palacios
Secretario de Servicios Educativos

Javier Tapia Santoyo
Secretario de Administración

José Alejandro Camacho Sánchez
Secretario Ejecutivo del Patronato de
Obras e Instalaciones

Marx Yazalde Ortiz Correa
Abogado General

Modesto Cárdenas García
Presidente del Decanato

Marco Antonio Ramírez Urbina
Coordinador de Imagen Institucional

Diana Verónica Cortés Espinosa
Directora del CIBA-IPN, Tlaxcala

María del Carmen Cruz López
Subdirectora Académica del CIBA-IPN, Tlaxcala

Erik Ocaranza Sánchez
Subdirector de Vinculación del CIBA-IPN, Tlaxcala

Víctor Eric López y López
Editor en jefe

Miriam Martínez Méndez
Coordinadora de Enlace y Gestión Técnica

Jaime Rivera Contreras
Diseño y Diagramación Frontera Biotecnológica

Wendy Flores Trejo
Fotografía y Diagramación

Ismael Sánchez González
Unidad de Tecnología Educativa y Campus Virtual

Gonzalo Pérez Araiza
Soporte Técnico

Lilia Espindola Rivera
Coordinadora Administrativa

ipn.mx

revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx

rfronterab@ipn.mx

FRONTERA BIOTECNOLÓGICA, año 13, número 31, mayo - agosto 2025, es una publicación cuatrimestral editada por el Instituto Politécnico Nacional a través del Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac - Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700, México. Conmutador IPN:57296000, Ext. 87816. <http://www.revistafronterabiotecnologica.cibatlaxcala.ipn.mx/>, Editor responsable: Dr. Víctor Eric López y López. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título No. 04-2015-120313501700-203, ISSN: 2448-8461, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Dr. Víctor Eric López y López., Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac - Tepetitla Km 1.5, Tlaxcala C.P. 90700, fecha de última modificación, 11 de julio de 2025.

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 del Instituto Politécnico Nacional.

Contenido

6

**Mensaje
Editorial**

8

**Inoculantes
microbianos: los
grandes aliados
en la agricultura
sostenible**

18

**Gramíneas,
forrajes y
biotecnología
aplicada**

26

**El papel de la
microgravedad en
el desarrollo de
fármacos**

34

**JABONES
ARTESANALES
CON EXTRACTOS
ANTIOXIDANTES:
entre ciencia,
tradicción y beneficios
para la piel.**

46

**ARQUEAS
HALÓFILAS,
LA VIDA EN ROSA**

58

**Microorganismos
que extraen litio:
una solución
sostenible desde la
biotecnología**

70

**Aplicaciones y
aprovechamiento
biotecnológico de los
hongos ascomicetos
coprófilos de México**

80

**Los hongos y su
microuniverso
molecular**

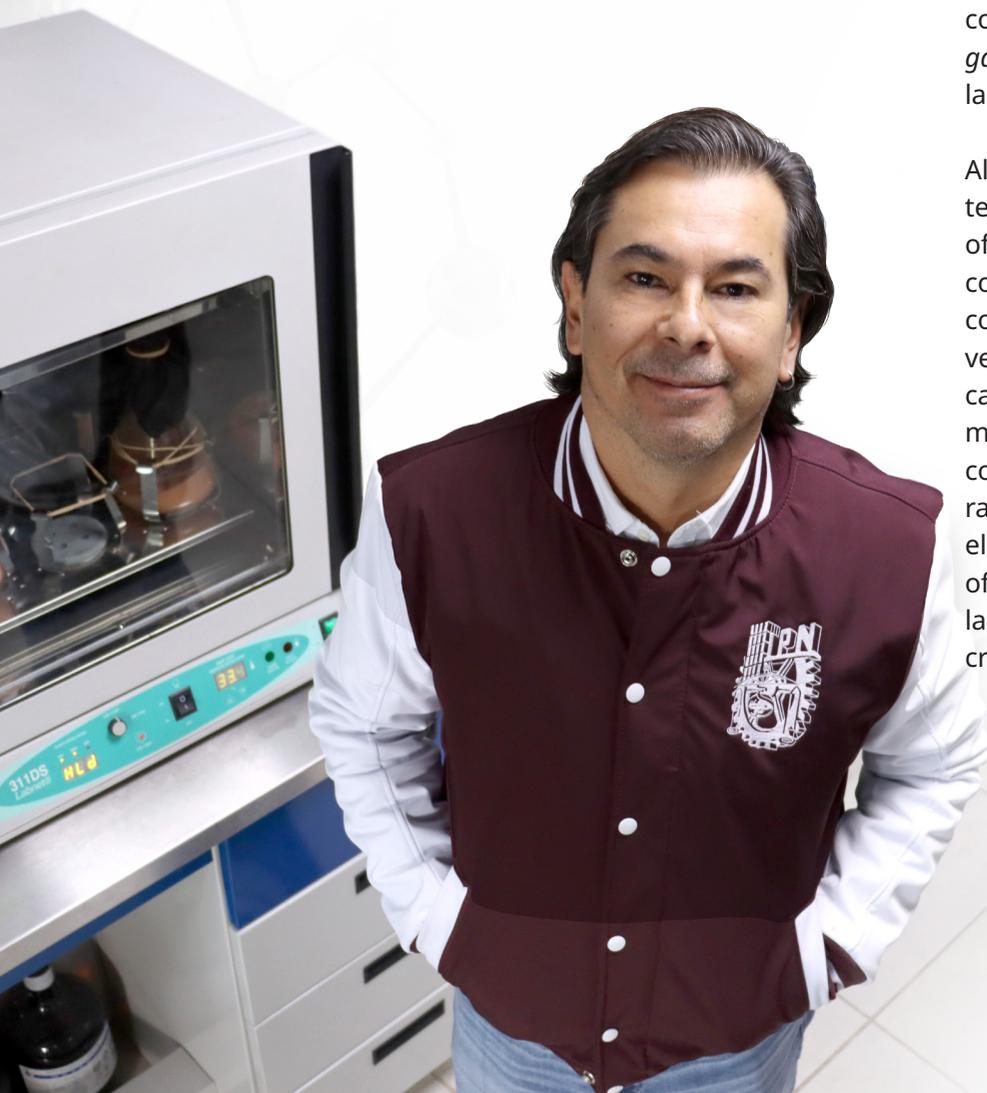


Mensaje Editorial

mayo 2025

Apreciables lectores, antes de que comenzara oficialmente el verano, nuestro país atravesó una ola de calor insoportable que, desafortunadamente, se está volviendo cada vez más común. Aunque algunas lluvias han sido torrenciales, siempre es mejor contar con más agua, ya que es indispensable para vivir. Estas lluvias intensas pueden compararse con la situación política mundial actual, que por muchas razones y circunstancias está afectando profundamente a todo el mundo. Solo nos queda confiar en que... *Después de la tormenta venga la calma...* esa calma tan necesaria para la humanidad.

Al abordar el número 31 de Frontera Biotecnológica, exploraremos las ventajas que ofrecen los biofertilizantes en contraste con los fertilizantes químicos, así como su contribución a la nutrición y el crecimiento vegetal, lo que resulta fundamental para alcanzar una agricultura sostenible, especialmente hoy en día. En ese sentido, leeremos como la Biotecnología nos ayuda en mejorar la calidad y rendimientos de forrajes con el uso de las compostas y vermicompostas, ofreciendo soluciones sostenibles. Por otro lado... ¿Sabían que la gravedad cero o microgravedad experimentada en vuelos es-



paciales nos puede ayudar a cristalizar proteínas. Así es, amigos, exploraremos este tema y esto nos permite caracterizarlas en su estructura tridimensional para entender sus interacciones y poder aplicarlas en el desarrollo de fármacos, lo cual es de gran relevancia en Biotecnología. ¿Quién dijo que las prácticas tradicionales no tienen fundamento científico? Vamos a leer sobre cómo la elaboración de jabones artesanales, al añadir extractos vegetales ricos en antioxidantes en momentos clave del proceso, puede ayudarnos en el cuidado de la piel. Cambiando de tema...¿Conocen qué es un extremófilo? Son organismos que pueden sobrevivir en condiciones extremas, ya sea en temperaturas muy altas o muy bajas, o en entornos con alta salinidad; nos hablarán sobre las arqueas halófilas que prosperan en ambientes con diez veces más sal que el agua del mar. Y si saben algo sobre los flamencos, su color se debe a la alimentación con estas arqueas, de las cuales también podemos obtener productos que son de interés para los humanos. En este orden de ideas, también leeremos de que las bacterias halotolerantes son de gran importancia en la recuperación de litio con un menor impacto ambiental en un proceso conocido como biolixiviación, lo cual es de gran importancia debido a la demanda que este metal alcalino tiene en la industria y su lugar tan importante en la fabricación de vehículos eléctricos.

En otro contexto, si mencionara la palabra "excreta", seguramente harían una mueca de desagrado, pero nos hablarán sobre cómo los hongos que facilitan la descomposición y el reciclaje de nutrientes presentes en las heces de los animales pueden generar moléculas con propiedades farmacológicas contra bacterias, virus, otros hongos o incluso con usos cosméticos, lo cual es realmente fascinante. ¿No lo piensan así? Y para concluir, en un próximo estudio nos ayudarán a ampliar nuestra comprensión de que los hongos, además de ser cruciales para la conservación de los ecosistemas, nos permiten obtener numerosos compuestos de interés humano con diversas aplicaciones, representando un vasto universo de productos potenciales.

Finalmente, amigos míos, disfruten de este verano para recargar sus energías, continuar trabajando día a día es la única manera en que nuestro país pueda prosperar ante los retos económicos que enfrenta. Recuerden que somos un país abundante en recursos naturales que incluso las grandes potencias no poseen. Desde la perspectiva de la Biotecnología, siempre nos esforzaremos, siempre, por poner... "La Técnica al Servicio de la Patria"

Dr. Víctor Eric López y López

Editor en Jefe



INOCULANTES MICROBIANOS: LOS GRANDES ALIADOS EN LA AGRICULTURA SOSTENIBLE

*Nava Galicia Soley B¹., Flores González Ariadne E.¹, Cortés Espinosa Diana V.¹,
Bibbins Martínez Martha D.¹

¹ Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Instituto Politécnico Nacional. Carretera Estatal
Tecuexcomac-Tepetitla Km 1.5 Tlaxcala, México

Correo electrónico: *snava@ipn.mx

RESUMEN

Este artículo está centrado en la importancia de los biofertilizantes a base de microorganismos vivos o inoculantes microbianos en la agricultura, las ventajas en comparación con los fertilizantes de origen químico, para evitar el deterioro ambiental a través de la práctica agrícola sostenible. De igual manera se resalta la importancia de comprender la participación de los inoculantes en la nutrición y crecimiento vegetal mediante la fijación de nutrientes, producción de hormonas y biocontrol de patógenos. Finalmente se analiza el panorama de los inoculantes microbianos comerciales, mismos que a lo largo del tiempo han enfrentado una serie de obstáculos, y que, dadas las tendencias internacionales, en torno a la existencia de normativas, buscan impulsar prácticas agrícolas sostenibles, por lo que el mercado de este tipo de productos muestra una tendencia mucho más favorable.

Las perspectivas futuras en este importante campo de investigación están encaminadas a lograr un equilibrio entre la sinergia de los microorganismos con el cultivo para generar una agricultura sostenible.

Palabras clave: *Agricultura sostenible, Fertilizantes, Inoculantes microbianos*

ABSTRACT

The present article focuses on the importance of biofertilizers based on live microorganisms and microbial inoculants to agriculture and the advantages of the use of these products over the use of chemical fertilizers, promoting the application of sustainable agriculture to prevent environmental degradation. Moreover, it emphasizes the need to understand their role in plant nutrition and growth through nutrient fixation, hormone production, and pathogen biocontrol. Finally, the article describes the panorama of commercial microbial inoculants, which, over time, have encountered a series of obstacles. However, given the international trends around regulations seeking to drive the uptake of sustainable agricultural practices, the market for these products is now much more favorable. In the future, this crucial field of research aims to achieve a balance in the synergy between microorganisms and crops to foster sustainable agriculture.

Keywords: *Fertilizers, Microbial inoculants, Sustainable agriculture*



INTRODUCCIÓN

Ante el creciente aumento de la población y la consiguiente demanda de alimentos, se buscan alternativas sostenibles, como el uso de biofertilizantes en la agricultura. Uno de los principales requisitos para garantizar una adecuada nutrición de los cultivos son los nutrientes del suelo, vitales para el crecimiento y rendimiento de estos. Los principales elementos químicos reconocidos como esenciales para las plantas son diecisiete e incluyen fuentes de carbono (C^{-4}/C^{+4}), nitrógeno (N^{-3}), oxígeno (O^{-}), hidrógeno (H^{+}) y minerales como potasio (K^{+}), magnesio (Mg^{2+}), calcio (Ca^{2+}), fósforo (P^{3-}), azufre (S^{2-}), manganeso (Mn^{2+}/Mn^{4+}), zinc (Zn^{2+}), cobre (Cu^{2+}/Cu^{+}), molibdeno (Mo^{2+}), níquel (Ni^{2+}), cloro (Cl), boro (B^{3-}/B^{3+}) y hierro (Fe^{2+}). En ausencia de estos nutrientes, las plantas no pueden completar su ciclo de vida ni llevar a cabo funciones fisiológicas normales (Figura 1) (Osman 2013). La agricultura actual depende completamente de los fertilizantes de origen químico y/o natural para proporcionar estos elementos esenciales y de esta forma aumentar el rendimiento de los cultivos (Peoples et al. 2014, IFA 2020). Los fertilizantes químicos se utilizan para proporcionar nutrientes necesarios para las plantas en tiempos cortos y obtener re-

sultados rápidos, al ser aplicados producen una alta concentración de nutrientes, pero conllevan efectos adversos al ambiente, entre ellos la contaminación del agua causada por la lixiviación y evaporación, lo que produce toxicidad e infertilidad del suelo (Rashmi et al. 2020).

Por otra parte, los fertilizantes de origen natural tienen un menor impacto ambiental en suelo, agua y aire. Pueden mejorar la estructura del suelo y su fertilidad. Dentro de esta categoría, los inóculos microbianos pueden promover el crecimiento de las plantas porque actúan en la descomposición de la materia orgánica, que incrementan la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas, favoreciendo el desarrollo vegetal por la producción de hormonas de crecimiento, así como, mejorar el entorno agroecológico (Lalitha 2017). A pesar de estos beneficios, su empleo es limitado sobre todo en países en desarrollo donde la falta de inversión por el sector industrial, la complejidad para producir, así como los elevados costos para el registro de productos y la poca legislación para su aprobación, han limitado la disponibilidad de biofertilizantes en el mercado (Joshi et al. 2022).

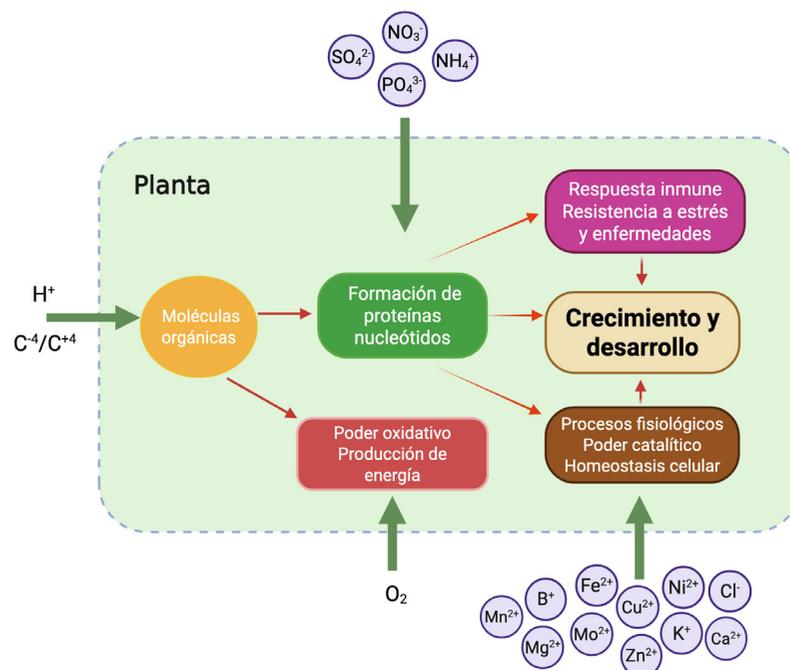


Figura 1. Nutrientes esenciales para mejorar y mantener la salud de las plantas

2

LOS BENEFICIOS DE LOS MICROORGANISMOS PROMOTORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL APLICADOS EN LA AGRICULTURA

Los biofertilizantes son formulaciones que incorporan microorganismos vivos, como bacterias, hongos y algas, los cuales favorecen el crecimiento de las plantas mediante distintos mecanismos (Zhao 2024). Estos microorganismos generalmente se denominan microbios promotores de crecimiento vegetal (MPCV), bacterias promotoras de crecimiento vegetal (BPCV) o rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV), los cuales ayudan a la absorción de nutrientes mediante

sus asociaciones en la zona rizosférica cuando se suministran a las plantas ya sea a través de semillas o del suelo (Vessey 2003), lo que contribuye en el aumento de rendimiento de los cultivos y la fertilidad de los suelos mejorando el ciclo de nutrientes, promoviendo la salud del suelo, la síntesis de sustancias que las plantas pueden asimilar directamente, la inducción de resistencia de la planta al estrés y la prevención de enfermedades (García-Fraile 2015; Maçik 2020).

2.1 ¿Y cómo hacen los microorganismos para mejorar el aporte de los nutrientes a las plantas?

La forma en que las plantas aprovechan los nutrientes depende de su estructura. Por ejemplo, no pueden absorber directamente el nitrógeno del aire. Sin embargo, ciertos microorganismos fijadores de nitrógeno utilizan la enzima nitrogenasa para convertirlo en amoníaco (NH_4^+) o nitratos (NO_3^-), haciéndolo accesible para su absorción.

La mayoría del fósforo presente en el suelo, tanto en su forma orgánica como inorgánica, no se puede absorber por las plantas (Zhao 2024). Los microorganismos que solubilizan el fósforo, como bacterias de los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas*, así como hongos, *Trichoderma spp.*, liberan enzimas como fitasas, nucleasas, fosfatasas y diversos ácidos orgánicos. Estas sustancias permiten la hidrólisis y solubilización del fósforo orgánico, transformándolo en fosfato, la forma en la cual las plantas pueden absorberlo (Zhao 2024). La mayor proporción de potasio en el suelo se encuentra unido a minerales como feldespato potásico, moscovita, illita y vermiculita, lo que impide su disponibilidad para las plantas. Los microorganismos solubilizadores de potasio producen compuestos como ácidos orgánicos (ácido cítrico, tartárico, oxálico principalmente) que liberan iones de potasio de los minerales, así mismo; producen exopolímeros en forma de biopelícula donde las células producen polisacáridos extracelulares (conglomerado de proteínas, lípidos y ADN) creando microambientes óptimos para una solubilización efectiva. Este mecanismo también ayuda a disminuir el pH y facilitar la quelación (unión a ion metálico) para acelerar la solubilización y disponibilidad de potasio para la planta (Figura 2) (Xue et al. 2018; Muthuraja y Muthukuma 2021; Olaniyan et al. 2022).

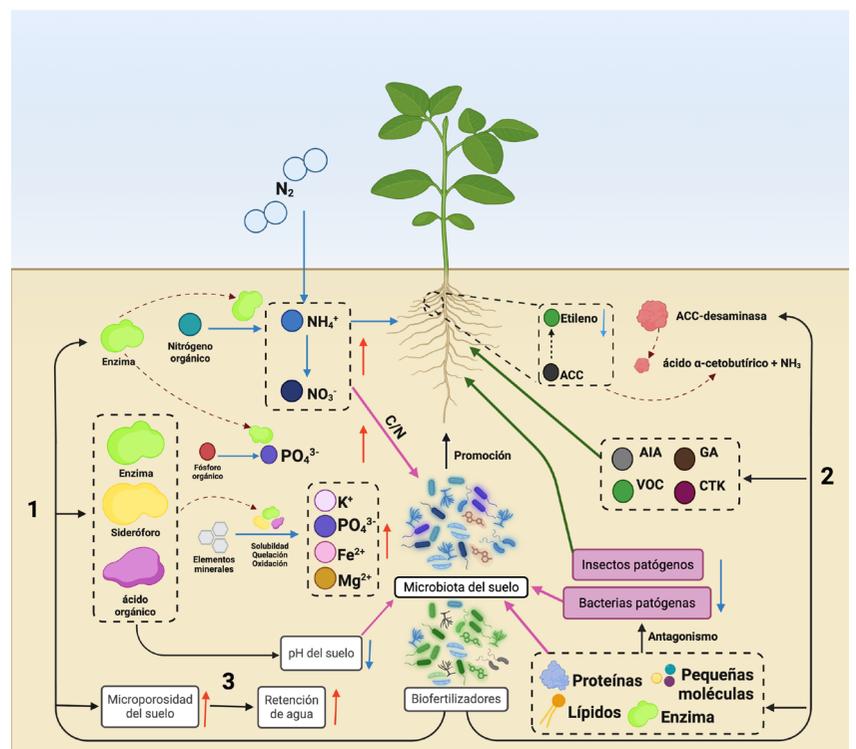


2.2 Los microorganismos, los grandes aliados en el desarrollo de las plantas

Los microorganismos tienen la capacidad de regular el crecimiento, desarrollo y la respuesta al medio ambiente de las plantas, debido a que aumentan la disponibilidad de macro y micronutrientes, además de sintetizar y/o modular la biosíntesis de fitohormonas como ácido indol acético (AIA), giberelina (GA), citoquinina (CK), 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC)-desaminasa y etileno. Por ejemplo; el etileno es una hormona vegetal clave que regula diversos procesos fisiológicos, como el crecimiento de la raíz y pelos radiculares, maduración de frutos, senescencia de hojas, formación de estomas y la respuesta a factores de estrés (Iqbal 2017). Su nivel, influenciado por las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, impacta el desarrollo del sistema radicular. Bajos niveles de su precursor (ACC) estimulan la formación de raíces laterales, mientras que concentraciones más altas pueden inhibir el crecimiento de la raíz principal. Por lo tanto, el etileno puede inhibir o estimular el crecimiento vegetal, dependiendo de la especie y la con-

centración hormonal (Vandenbussche 2012). Por otra parte; también producen metabolitos volátiles (VOC), que pueden inducir resistencia a enfermedades y tolerancia al estrés abiótico, mitigando el estrés al incrementar los exopolisacáridos, osmorreguladores, como la glicina betaína (GB) y antioxidantes (catalasa-CAT), la superóxido dismutasa (SOD), el ascorbato (Asc) y el glutatión (GSH), reduciendo las especies reactivas de oxígeno (ROS) y el estrés oxidativo (Tsukanova et al. 2017; Khan, 2019). De igual forma, las bacterias de la rizosfera que producen sideróforos pueden incrementar la disponibilidad de hierro en las plantas y fortalecer su tolerancia a altas concentraciones de metales pesados (Zhao 2024). Finalmente, los biofertilizantes pueden producir antibióticos, como en el caso particular de varias cepas de *Bacillus* destacan en el control de hongos fitopatógenos gracias a la producción de pioluteorina, pirronitrina, ácido fenacin-1-carboxílico y 2,4-diacetilfloroglucinol. (Kefi et al. 2015; Mahanty et al. 2017).

Figura 2. Mecanismo de promoción del crecimiento vegetal por biofertilizantes. (1) Mejorar el estado nutricional de las plantas, liberando elementos minerales por disolución, quelación y oxidación (2) Regula el crecimiento vegetal, por medio del incremento o decremento de hormonas vegetales, secretar COV's, entre otros (3) Finalmente; mejorar las condiciones ambientales del suelo, al cambiar su microporosidad y facilitar la retención de agua. (modificado de Zhao, 2024)



DESARROLLO Y COMERCIALIZACIÓN DE LOS BIOFERTILIZANTES

La aplicación de biofertilizantes en la agricultura es realizada desde principios del siglo pasado, siendo "Nitragin" (*Rhizobium* sp) el primer producto patentado (USP Patent No. 570,813, noviembre de 1896) (Arora et al. 2017). Actualmente, la demanda de biofertilizantes microbianos va en aumento en todo el mundo. El número de empresas emergentes que desarrollan y comercializan productos microbianos ha aumentado

significativamente, AgBiome, BioInnovations, Indigo, Maronne y New Leaf Symbiotics son algunos ejemplos (Batista 2021). Siendo India, China, EE. UU. y Alemania los líderes actuales en la investigación de inóculos microbianos a nivel mundial. El impulso de este tipo de biotecnología se debe principalmente a un mayor grado de conciencia ambiental, así como al desarrollo de una legislación más estricta para el campo. Por ejemplo, el nuevo Pacto Verde de la Unión Europea tiene como objetivo reducir el uso de fertilizantes nitrogenados en al menos un 20% y el uso de pesticidas químicos en un 50% para 2030 (Batista 2021), la reducción de estos insumos químicos tendría amplios beneficios ambientales y de sostenibilidad. En tanto que China ha legislado los planes de acción para el uso de fertilizantes, así como pesticidas, aplicados desde 2020 (Shuqin y Fang 2018), donde se impulsa a una agricultura sostenible, mejorando la eficiencia de los insumos y garantizando la salud pública.

En la tabla 1 se muestran algunos ejemplos de empresas desarrolladoras de biofertilizantes cuyos productos ya son comercializados a nivel mundial (Sammauria et al. 2020).



Tabla 1. Biofertilizantes comercializados por empresas internacionales

Producto®	Empresa	Cepa Bacteriana	País de origen
Nodulator®	BASF SE	<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	Alemania
Varios	DuPont de Nemours and Company	Consorcio PGPR	EEUU
Cell-Tech® Nitragin Gold®	Novozymes	<i>Rhizobium leguminosarum</i>	Dinamarca
TagTeam®		<i>Rhizobia + Penicillium bilaii</i>	
Accomplish®	Verdesian Life Sciences LLC	PGPR + enzimas + ácidos orgánicos + quelantes	EEUU
EVL coating®	EVL Inc.	Consorcio PGPR	Canadá

4

PANORAMA ACTUAL DE LOS BIOFERTILIZANTES EN MÉXICO

A pesar de la baja rentabilidad de la actividad agrícola y, por ende, urgente necesidad de innovaciones tecnológicas, la producción activa de biofertilizantes en México sigue siendo limitada y se realiza principalmente en pequeñas empresas, instituciones de educación e investigación y por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) apoyado por el gobierno federal o municipal (Grageda et al. 2012). Las empresas; Biofábrica Siglo XXI, Biofertilizantes Mexicanos S.A de C.V, GreenCorp Biorganiks de México S.A. DE C.V. han introducido al mercado nacional una serie de productos registrados. Sin embargo, al igual que en la tendencia mundial, en nuestro país se muestra un crecimiento en investigación y desarrollo de estos productos, con un enfoque en la agricultura sostenible como medio para reducir la contaminación, proteger la biodiversidad y fomentar la seguridad alimentaria, lo que sin duda puede contribuir al desarrollo económico y la preservación de los recursos naturales del país (Tabla 2).

Producto®	Empresa	Cepa Bacteriana	Cultivo
AZOFER®	Biofábrica Siglo XXI	<i>Azospirillum brasilense</i>	IMPI 00-006
AZOTON AA PLUS®	Biofertilizantes Mexicanos S.A de C.V,	<i>Azospirillum</i> spp y <i>Azotobacter</i> spp	hortalizas, frutales y ornamentales
INOCREP®	BUAP	<i>Pseudomonas putida</i> KT2440	maíz
Bio Control Fol®	AgriBest	bacterias antagonistas y productoras de antibióticos	varios
BactoCROP®	Bioqualitum	<i>Bacillus</i> y <i>Azospirillum</i>	maíz, frijol, cebada, avena, trigo o sorgo
Nutripellet®	Bioqualitum	<i>Bacillus</i> spp, <i>Nitrobacter</i> sp, <i>Pseudomonas fluorescens</i>	hortalizas, granos
AZOS® Blue Powder	RTI AG	<i>Azospirillum brasilense</i>	Cereales y hortalizas

Tabla 2. Biofertilizantes elaborados en México

5

RETOS A FUTURO DE LOS BIOFERTILIZANTES

Dentro de los retos a considerar en el establecimiento y éxito de los biofertilizantes en México, podemos mencionar los siguientes: 1. Desarrollo e implementación de tecnologías innovadoras que puedan competir con la industria de los fertilizantes químicos. Esto incluye la mejora de formulaciones que aumenten la resistencia de los microorganismos a factores adversos como el calor, la desecación y la competencia con microorganismos nativos (Yadav 2024). Por ejemplo; el empleo de consorcios con varios microorganismos puede combinar diferentes capacidades microbianas en un producto con efectos diversos de promoción y rendimiento. De igual forma comprender los diversos mecanismos que rigen la supervivencia y persistencia de los biofertilizantes en diferentes ambientes edáficos es fundamental para mejorar su estabilidad a largo plazo. Recientemente, la manipulación genética es otra forma de mejorar la estabilidad de los biofertilizantes (Yadav 2024), sin embargo,

la producción, importación y liberación al medio ambiente que se basan en microorganismos genéticamente modificados tienen restricciones en diferentes países y México no es la excepción. Finalmente, se debe invertir en la creación de tecnologías de aplicación más efectivas y económicas, así como en la mejora de los procesos de producción a gran escala para reducir los costos (Palacios 2023).

2. Cambio de la percepción de los agricultores, basado en la información y en la conciencia de protección al ambiente, para llevar a cabo esto se requieren programas de capacitación, demostraciones prácticas en campo y estudios de caso que muestren el impacto positivo de su uso. Para ello, el apoyo gubernamental es primordial ya sea como incentivos o subsidios, que motiven a los agricultores a adoptar estas tecnologías y a cambiar sus prácticas agrícolas hacia modelos más responsables y productivos (Palacios 2023, Sembrando México 2024).

6

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

El desarrollo y aplicación de biofertilizantes en México tiene un gran potencial para enfrentar la creciente demanda de productos agrícolas y reducir el impacto ambiental. Sin embargo, es necesario abordar los desafíos existentes y trabajar hacia la promoción, distribución y adopción de estas tecnologías.



REFERENCIAS

- Arora, N. K., Verma, M., & Mishra, J. (2017). Rhizobial bioformulations: past, present and future. *Rhizotrophs: Plant growth promotion to bioremediation*, 69-99.
- Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA), (2020) <https://www.fertilizer.org/>
- Batista, B. D., & Singh, B. K. (2021). Realities and hopes in the application of microbial tools in agriculture. *Microbial Biotechnology*, 14(4), 1258-1268.
- García-Fraile, Paula. Menéndez Esther and Rivas Raúl. (2015). Role of bacterial biofertilizers in agriculture and forestry. Review. *AIMS Bioengineering*, Volume 2, Issue 3, 183-205. DOI: 10.3934/bioeng.2015.3.183
- Grageda-Cabrera, Oscar Arath, Díaz-Franco, Arturo, Peña-Cabriales, Juan José, & Vera-Núñez, José Antonio. (2012). Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(6), 1261-1274.
- Iqbal, N., Khan, N. A., Ferrante, A., Trivellini, A., Francini, A., & Khan, M. I. R. (2017). Ethylene role in plant growth, development and senescence: interaction with other phytohormones. *Frontiers in plant science*, 8, 475.
- Joshi, S. K., & Gauraha, A. K. (2022). Global biofertilizer market: Emerging trends and opportunities. *Trends of applied microbiology for sustainable economy*, 689-697.
- Khan, N., Bano, A., Rahman, M. A., Guo, J., Kang, Z., & Babar, M. A. (2019). Comparative physiological and metabolic analysis reveals a complex mechanism involved in drought tolerance in chickpea (*Cicer arietinum* L.) induced by PGPR and PGRs. *Scientific reports*, 9(1), 2097.
- Kefi, A., Slimene, I. B., Karkouch, I., Rihouey, C., Azaeiz, S., Bejaoui, M., ... & Limam, F. (2015). Characterization of endophytic *Bacillus* strains from tomato plants (*Lycopersicon esculentum*) displaying antifungal activity against *Botrytis cinerea* Pers. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31, 1967-1976
- Lalitha, S. (2017). Plant growth-promoting microbes: a boon for sustainable agriculture. *Sustainable agriculture towards food security*, 125-158.
- Lopes, M. J. D. S., Dias-Filho, M. B., & Gurgel, E. S. C. (2021). Successful plant growth-promoting microbes: inoculation methods and abiotic factors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 606454.
- Maçik, M., Gryta, A., & Frąc, M. (2020). Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. *Advances in agronomy*, 162, 31-87.
- Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A., & Tribedi, P. (2017). Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 3315-3335.
- Muthuraja, R., & Muthukumar, T. (2021). Isolation and characterization of potassium solubilizing *Aspergillus* species isolated from saxum habitats and their effect on maize growth in different soil types. *Geomicrobiol J*, 38(8), 672-685.
- Olaniyan, F. T., Alori, E. T., Adekiya, A. O., Ayorinde, B. B., Daramola, F. Y., Osemwegie, O. O., & Babalola, O. O. (2022). The use of soil microbial potassium solubilizers in potassium nutrient availability in soil and its dynamics. *Annals of Microbiology*, 72(1), 45.
- Osman, K.T. (2013). Plant Nutrients and Soil Fertility Management. In: *Soils*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2_10
- Palacios-López, L. A. (2023). El uso de biofertilizantes en la agricultura moderna sus avances, desafíos y perspectivas. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 1(2), 52-64.
- Peoples M.B., Richardson A.E., Simpson R.J., Fillery I.R.P., (2014). Soil: Nutrient Cycling, Editor(s): Neal K. Van Alfen, *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, Academic Press, Pages 197-210, ISBN 9780080931395, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00094-2>
- Rashmi, I., Roy, T., Kartika, K. S., Pal, R., Coumar, V., Kala, S., & Shinoji, K. C. (2020). Organic and inorganic fertilizer contaminants in agriculture: Impact on soil and water resources. *Contaminants in Agriculture: Sources, Impacts and Management*, 3-41.
- Rees, D. C., Akif Tezcan, F., Haynes, C. A., Walton, M. Y., Andrade, S., Einsle, O., & Howard, J. B. (2005). Structural basis of biological nitrogen fixation. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 363(1829), 971-984.
- Sammauria, R., Kumawat, S., Kumawat, P., Singh, J., & Jatwa, T. K. (2020). Microbial inoculants: potential tool for sustainability of agricultural production systems. *Archives of microbiology*, 202(4), 677-693.
- Sembrando México (2024) <https://sembrandomexico.com.mx/biofertilizantes-agricultura-mexicana/>
- Shuqin, J., & Fang, Z. (2018). Zero growth of chemical fertilizer and pesticide use: China's objectives, progress and challenges. *Journal of resources and ecology*, 9(1), 50-58.
- Tsukanova, K. A., Meyer, J. J. M., & Bibikova, T. N. (2017). Effect of plant growth-promoting *Rhizobacteria* on plant hormone homeostasis. *South African journal of botany*, 113, 91-102.
- Vandenbussche, F., & Van Der Straeten, D. (2012). The role of ethylene in plant growth and development. *Annual Plant Reviews Volume 44: The Plant Hormone Ethylene*, 44, 219-241.
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and soil*, 255, 571-586.
- Xue, X., Zhang, L., Peng, Y., Li, P., & Yu, J. (2019). Effects of mineral structure and microenvironment on K release from potassium aluminosilicate minerals by *Cenococcum geophilum* fr. *Geomicrobiology Journal*, 36(1), 11-18.
- Yadav, A., & Yadav, K. (2024). Challenges and opportunities in biofertilizer commercialization. *SVOA Microbiol*, 5(1), 1-14.
- Zhao, G., Zhu, X., Zheng, G., Meng, G., Dong, Z., Baek, J. H., ... & Jia, B. (2024). Development of biofertilizers for sustainable agriculture over four decades (1980-2022). *Geography and Sustainability*, 5(1), 19-28.

Ofertas de Servicios Tecnológicos Especializados



Control Ambiental

- Análisis de aguas residuales. (DBO, DQO, SST, turbiedad, pH, grasas, metales, cianuros, etc.)
- Análisis de contaminantes en suelos.
- Determinación de nitrógeno total en plantas.

Industria Alimentaria

- Elaboración de tabla nutrimental.
- Análisis proximales.
- Análisis microbiológicos.

Industria Agrícola

- Cultivo in vitro e hidropónico.
- Identificación y control de plagas.
- Análisis de suelos.
- Determinación de contaminantes en agua y suelo.
- Desarrollo de biofertilizantes.

Estrategia Empresarial

- Análisis de factibilidad técnico - económica de proyectos de inversión de base tecnológica.

Biología Molecular

- Identificación molecular de variedades de plantas.
- Identificación molecular de hongos, algas y bacterias por 16s.
- Identificación de cepas BAL.

Industria de Procesos Bioquímicos

- Análisis elemental (CHON-SI).
- Análisis y diseño de bioprocesos.
- Aplicaciones específicas de secado y extracción sólido líquido.
- Análisis y determinación de compuestos por cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC) y cromatografía de gases (CG).
- Análisis electroforético de proteínas y por cromatografía de líquidos (FPLC).
- Extracción y purificación de proteínas por cromatografía.

Industria de Materiales (Nanobiotecnología)

- Análisis por espectroscopia
- FTIR
- UV-VISIBLE
- RAMAN



Ex-Hacienda San Juan Molino,
Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla km 1.5,
Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, México. C.P. 90700



Red IPN: (+52) 55 57 29 6000, Ext. 87816.



direccionciba@ipn.mx

Gramíneas, forrajes y biotecnología aplicada

Javier Ruiz-Romero^{1*}, Angélica Romero Rodríguez¹,
Rigoberto Castro-Rivera¹, José Agustín Pacheco-Ortiz¹,
Brenda Yanin Azcárraga-Salinas¹, Andres Castro-Sierra¹,
Juan Luis Soto-García¹

¹Instituto Politécnico Nacional, CIBA Tlaxcala. Ex-Hacienda San Juan Molino,
Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla Km. 1.5, C.P. 90700. Tlaxcala, México

*Autor para correspondencia: jruizr1800@alumno.ipn.mx



RESUMEN

Las gramíneas, como el maíz, trigo y arroz, son esenciales en la alimentación de humanos y animales, aportan hasta 80% del requerimiento diario de carbohidratos. Además de su valor alimenticio, estas especies también se utilizan en la producción de bioetanol; sin embargo, su elevado contenido de lignina representa una limitación para la eficiencia del proceso. En la producción de forrajes, la calidad depende de factores como la frecuencia de defoliación, ya que cortes muy seguidos reducen la biomasa y aumentan la lignina, afectando el valor nutricional. La biotecnología ofrece soluciones para mejorar la calidad y rendimiento de los forrajes, como el uso de abonos orgánicos (composta, vermicomposta) que incrementan la producción de materia seca, mejoran el suelo y reducen desechos. Estudios demuestran que estos métodos aumentan los rendimientos hasta en un 71% y mejoran la calidad del suelo a largo plazo. La investigación en biotecnología aplicada a forrajes es clave para optimizar la producción, reducir costos y promover prácticas agrícolas sostenibles.

Palabras clave: Forraje, gramíneas, biotecnología

ABSTRACT

Grasses such as corn, wheat, and rice are essential for both human and animal nutrition, providing up to 80% of daily carbohydrate intake. In addition to their nutritional value, these species are also used in bioethanol production; however, their high lignin content poses a limitation to process efficiency. In forage production, quality depends on factors such as defoliation frequency, as overly frequent cutting reduces biomass and increases lignin content, negatively affecting nutritional value. Biotechnology offers solutions to enhance forage quality and yield, such as the use of organic fertilizers (compost, vermicompost), which increase dry matter production, improve soil health, and reduce waste. Studies have shown that these methods can boost yields by up to 71% and improve long-term soil quality. Research in biotechnology applied to forage crops is essential to optimize production, lower costs, and promote sustainable agricultural practices.

Keywords: Forage, grasses, biotechnology

INTRODUCCIÓN

Las gramíneas son un grupo de plantas herbáceas y leñosas que pertenecen al orden de las poales, dentro de las monocotiledóneas. A nivel mundial se reconocen más de 702 géneros y 9,675 especies de gramíneas. En México, ocupan el tercer lugar en cuanto al número de especies, con la presencia de 11 subfamilias, 205 géneros y 1,216 especies registradas en el territorio nacional (Dávila *et al.*, 2018). La domesticación de las gramíneas inició hace miles de años, en particular para México data de hace 8000 años (Diamond 2012), el cual es un cultivo que a la fecha es esencial en la dieta diaria. Los cereales pertenecientes a esta familia, por sí mismos son

capaces de aportar entre el 70 y 80% de los requerimientos de hidratos de carbono al día, así mismo, aportan macro y micronutrientes, proteínas, fibra dietética, vitaminas y minerales (Poole *et al.*, 2020). En términos de producción agrícola, las gramíneas más importantes de México son el maíz, la avena, sorgo, triticale, cebada y caña de azúcar (SIAP, 2019).

En esta revisión, se examinan diversos artículos científicos acerca de los usos y la conveniencia del uso de la biotecnología en la producción del forraje.



1.1 Usos de las gramíneas

La utilidad principal de las gramíneas radica en su consumo tanto por humanos y animales; sin embargo, otras aplicaciones históricas han sido su implementación como estructuras de carga para viviendas, plantas de ornato y en décadas recientes se ha evaluado como sustrato para la producción de bioetanol, no obstante, es necesario que la materia prima a utilizar venga de residuos industriales y no sea el objeto principal de los cultivos, debido a que esto incrementa los precios y genera escasez (Santiago-Ortega *et al.*, 2016). Gramíneas como el maíz o la caña de azúcar tienen una fotosíntesis C_4 (es decir, es-

pecializadas para fijar el CO_2 en compuestos de cuatro carbonos) son óptimas para su empleo como sustrato para obtener bioetanol debido a su contenido de celulosa superior a 40%. En las gramíneas el componente que afecta negativamente su utilización como alimento o como sustrato para bioetanol es la lignina, la cual limita la disponibilidad de celulosa y hemicelulosa, los cuales requieren ser hidrolizados a azúcares fermentables (Ventura-Rios *et al.*, 2021). Por tanto, es necesario centrar la investigación en métodos que permitan reducir la cantidad de lignina presente en el material vegetal.

1.2 Usos de las gramíneas

El término general “forraje” se emplea cuando una planta o parte de una planta es utilizada como alimento para un animal, generalmente ganado, esto es debido a que sus componentes principales podrán ser digeridos por animales herbívoros y ruminantes que tienen la capacidad de degradar la pared celular vegetal en su tracto digestivo. En el país existe una alta demanda de productos provenientes del sector primario, esto conlleva a una necesidad constante de altos volúmenes de forraje en fresco, así como a una mejora en cuanto a la calidad de este (SIAP, 2018). En el caso específico del ganado rumiante y la búsqueda de satisfacer sus requerimientos, la incorporación de forraje en su dieta será necesario para estimular el desarrollo ruminal en terneros jóvenes, posteriormente la incorporación de forrajes a la dieta adulta permitirá mantener la salud y microbiota del rumen

(Suárez *et al.*, 2006). El valor nutricional se dará en función de que tanto de lo ingerido se convertirá en producto animal, esto dependerá de la cantidad de forraje proporcionado, los nutrientes de este, la eficiencia de los procesos digestivos en el animal, así como su producción metabólica y anabólica. Algunos indicadores de calidad como el contenido de proteína han sido establecidos, sin embargo, las fracciones de fibra vegetal son las principales determinantes de la digestibilidad (Goujon *et al.*, 2003).

1.3 ¿Calidad o cantidad?

La senescencia es un proceso natural de envejecimiento celular que no se limita únicamente a las plantas, pero en ellas implica cambios fisiológicos y bioquímicos que conducen al deterioro progresivo de los tejidos, especialmente en las hojas. Este proceso puede afectar negativamente la calidad del forraje, ya que reduce el contenido de nutrientes disponibles para el consumo animal. Permitir la senescencia en cultivos forrajeros limita la producción de biomasa y su valor nutricional. En pasturas la senescencia de las hojas y la composición morfológica, dependen principalmente del manejo agronómico (Villalobos & WingChin, 2019). La reducción en senescencia se puede lograr mediante manejos estratégicos que impliquen defoliaciones, estos permiten obtener un forraje de mejor composición, aunque en cantidad sea menor a lo que se obtendría de

dejarse crecer más tiempo. Algo muy importante al determinar la frecuencia de defoliación es considerar la capacidad de crecimiento de cada especie, pues cuanto mayor es la frecuencia de defoliación, menor es el tiempo de crecimiento de descanso que le permitirá a la planta generar biomasa, así mismo, entre mayor tiempo se permita a la especie crecer: la calidad del forraje obtenido decrece, debido al incremento porcentual de lignina del que se compone y va reduciendo la disponibilidad de los nutrientes (Carambula, 2007). Frecuencias de defoliación muy cortas podrían poner en riesgo la permanencia de la especie vegetal en cuestión, por lo que planear un balance entre tiempos de descanso que le permitan a las plantas crecer y posteriormente manejar pastoreos adecuados, resulta de importancia para que el producto ingerido tenga el

mayor valor nutricional y dé el mayor aporte animal posible. Otro factor que se considera determinante en la productividad y persistencia de los cultivos forrajeros es la intensidad de la cosecha, definida como la altura a la que se realiza el corte en relación con el nivel del suelo (Rouquette et al., 2023). Esta variable interactúa directamente con la frecuencia de corte, ya que ambos influyen en la capacidad de rebrote de la planta a partir de sus reservas de carbohidratos no estructurales almacenadas en los tallos y raíces. Una cosecha demasiado severa, especialmente si se combina con cortes frecuentes, puede agotar estas reservas, disminuir el vigor del rebrote y reducir el rendimiento a largo plazo (Fulkerson & Donaghy, 2001). Por lo tanto, encontrar un equilibrio adecuado entre frecuencia e intensidad de corte es clave para maximizar la productividad forrajera sin comprometer la salud de la planta.

BIOTECNOLOGÍA APLICADA A LOS FORRAJES

El término biotecnología fue utilizado por primera vez en 1919 por el ingeniero agropecuario Károly Ereki, para referirse al proceso por el cual las materias primas podrían ser biológicamente transformadas en productos de gran utilidad para la sociedad (Ferrer & Moreno-Carranza, 2014). Una definición reciente es: "la biotecnología es la aplicación de la ciencia y la tecnología a organismos vivos, así como a partes, productos y modelos de estos, para alterar materiales vivos o no vivos con el fin de producir conocimiento, bienes y servicios" (OCDE, 2009), en diferentes países como Australia, Canadá o Francia se acepta que conforma la aplicación de ciencia y tecnología para mejorar el bienestar humano (Dahms, 2006), sin embargo, abarca tantas áreas y aspectos que no debe ser restringida por ningún aspecto molecular, agronómico o fisiológico. Considerando esta definición, surge la interrogante: ¿cómo aplicar la biotecnología en la producción de forraje? "Una de las aplicaciones más conocidas de la biotecnología es la modificación genética de plantas para mejorar la calidad del material vegetal. No obstante, debido a la controversia social que aún persiste en torno a los cultivos transgénicos en algunos contextos, es relevante destacar que existen enfoques biotecnológicos más accesibles y menos polémicos, como la producción de cultivos orgánicos o el uso de bioinsumos. Estos métodos representan alternativas viables y eficaces para mejorar la productividad y calidad de los cultivos forrajeros sin recurrir necesariamente a la ingeniería genética. La agricultura orgánica involucra considerar los cultivos como sistemas integrales en los que se busca integrar la biodiversidad, los ciclos geoquímicos y la biología del suelo, así mismo, busca la integración de residuos que permitan promover y mejorar la salud de los cultivos (Calvo et al., 2014). Los abonos orgánicos como la composta, la vermicomposta y sus lixiviados, el digestato y los estiércoles son enmiendas agrícolas



que mejoran la fertilidad del suelo y promueven un desarrollo vegetal saludable. La composta y la vermicomposta aportan materia orgánica estable, nutrientes esenciales y una comunidad microbiana activa que mejora la estructura del suelo y estimula el crecimiento de las raíces (Lazcano & Domínguez, 2011). Los lixiviados y el digestato, productos líquidos derivados del tratamiento de residuos orgánicos, contienen ácidos húmicos, microorganismos beneficiosos y nutrientes fácilmente asimilables por las plantas, lo que incrementa el rendimiento y fortalece la resistencia frente a patógenos (Albuquerque et al., 2012; Möller & Müller, 2012). Estos insumos, además de ser sostenibles, permiten reducir el uso de fertilizantes químicos, mejorar la salud del suelo y aumentar la producción de materia seca en cultivos forrajeros. El poder obtener estos productos no solo le conllevaría a los productores un ahorro en los insumos comprados, también, en el caso del compostaje o vermicompostaje permitiría incluso reducir la cantidad de desechos de los cuales sea necesario deshacerse y aunque, se deba considerar la mano de obra para atender los procesos de obtención de estos productos biotecnológicos, los rendimientos pueden ser considerablemente mayores.

1.4 Estudios aplicados

Investigaciones han demostrado que con la simple aplicación de composta a un cultivo de pasto ovillo les permitió obtener rendimientos 30% mayores en un periodo de 7 semanas a comparación de la ausencia de fertilizante (Aguilar-Benítez *et al.*, 2020). En otros estudios se han visto incrementos en rendimiento de 41% a comparación de su testigo con la adición de té de composta en cultivos de maíz forrajero e incluso encontraron que el material obtenido tenía una mayor capacidad antioxidante (Salas-Pérez *et al.*, 2018). Resultados similares en maíces forrajeros han verificado esto, encontrando que el añadir vermicomposta aumentó la producción de materia seca en un 71%, y cuando esta se cambiaba por composta el incremento era aproximadamente 55% superior a los testigos, pero también eran mayores a la fertilización química hasta por 15% (Fortis-Hernández *et al.*, 2009). En otra investigación donde se evaluó el efecto de la aplicación de fertilizante a través de largos periodos de tiempo, se realizaron aplicaciones de digestato líqui-

do en pasto ovillo durante 5 años, los resultados indicaron que aplicar digestato en al menos una concentración de 90 kg de nitrógeno por hectárea incrementó en al menos un 72% la materia seca cosechada durante su tiempo de evaluación en comparación al testigo, así mismo, se registró que su aplicación daba un incremento en los contenidos de nitrógeno y fósforo que medidos en el material vegetal obtenido en cada corte (Tilvikiene *et al.*, (2017). Otros estudios no solo encuentran que la aplicación de estos productos incrementa el rendimiento, también buscan analizar el efecto que tienen en el suelo a largo plazo y confirman un aumento en la cantidad de nitrógeno disponible, un efecto amortiguador en el pH y aumentos en la conductividad eléctrica (González-Salas *et al.*, 2018). El aumento de los rendimientos al aplicar estos productos biotecnológicos se explica porque no sólo conservan la humedad por periodos de tiempo mayores, además son una fuente de nutrientes a través de todo el ciclo productivo. Además de esto habría una actividad microbiológica constantemente en el periodo biodegradando materia y liberando iones para las plantas. En cuanto al contenido de lignina en las gramíneas, estudios (Johnson *et*



al., 2001) ya han demostrado efectivamente que la defoliación a intervalos menores da como resultado menores contenidos de lignina. En cuanto al efecto de las fertilizaciones en la pared celular las investigaciones no son concluyentes, sin embargo, hay trabajos que encuentran una reducción en el contenido de lignina cuando hay una fertilización con nitrógeno (Oleszek & Matyka 2017), aunque, otros estudios no encuentran diferencias estadísticas significativas en sus evaluaciones, por lo que es un área de investigación prometedora (Recep & Veyis, 2019).

Por último, en cuanto a estudios que analicen exclusivamente el efecto sobre el suelo, se ha encontrado que el añadir composta en cantidades de 40 t ha⁻¹ al suelo, fueron capaces de incrementar la porosidad, así como la conductividad eléctrica, se incrementaron los niveles de materia orgánica, intercambio catiónico y porcentaje de saturación de bases, con incrementos ligeros de los iones K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺ y Zn²⁺ (Hernández *et al.*, 2017).

Otras investigaciones, han demostrado que la implementación de estos productos en el suelo no solo es capaz de mejorar el rendimiento de los cultivos, también son poderosas alternativas a tener en cuenta para suelos que necesiten ser restaurados o rehabilitados por malas prácticas de cultivo o manejo, pues su incorporación puede restablecer los niveles de carbono orgánico mediante la fijación de materia orgánica y posibilitando el establecimiento de una cubierta vegetal estable, aumentando la biodisponibilidad de los macro y microelementos, así como los elementos traza (Hernández *et al.*, 2014).

2

CONCLUSIONES

Los productos biotecnológicos aplicados al área agrícola son una oportunidad de investigación muy prometedora para el rendimiento de los cultivos forrajeros, se vuelven una alternativa para el manejo de residuos y son opciones accesibles que permiten a los productores tener ciclos productivos más amigables con el ambiente y la aceptación social, por lo tanto se debe fomentar la investigación que involucre su aplicación y evaluación en diferentes condiciones y de diversas especies se vuelven de suma importancia para la alimentación y demanda de productos derivados de los forrajes en el país.



3

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo brindado a través del proyecto 20220605, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada No. 889355

REFERENCIAS

- Aguilar-Benítez G, Solís M, Castro-Rivera R, López-Gayou V, Lara-Ávila J, Esteves-Luna M (2020). Efecto de bacterias PGPB, composta y digestato en el rendimiento de materia seca de pasto ovinillo. *Rev Mex Cienc Agríc* 24:118-127. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i24.2363>
- Alburquerque JA, de la Fuente C, Bernal MP (2012). Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. *Agric Ecosyst Environ* 160:15-22. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.007>
- Calvo P, Nelson L, Kloepper JW (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil* 383(1-2):3-41.
- Carambula M (2007). Pasturas y forrajes; potenciales y alternativas para producir forraje. Hemisferio Sur, Montevideo, Uruguay. 186 pp.
- Dahms AS (2004). Biotechnology: What it is, what it is not, and the challenges in reaching a national or global consensus. *Biochem Mol Biol Educ* 32:271-278.
- Dávila P, Mejía-Saulés MT, Soriano-Martínez AM, Herrera-Arrieta Y (2018). Conocimiento taxonómico de la familia Poaceae en México. *Bot Sci* 96(3):462-514.
- Diamond J (2012). The local origins of domestication. In: Gepts P, Famula TR, Bettinger RL, Brush SB, Damania AB, McGuire PE, Qalsset CO (Eds) *Biodiversity in Agriculture: Domestication, evolution, and sustainability*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ellis NR, Moore LA, Hein MA (1948). Forage for livestock: plus and minus: an overall view. In: *Grass the yearbook of agriculture*. United States Department of Agriculture, Government Printing Office, Washington, DC. pp 75-80.
- Ferrer Ríos MG, Moreno-Carranza B (2014). Los grandes apellidos de la biotecnología. *Encuentros Multidisciplinares* 47:1-10.
- Fortis-Hernández M, Leos-Rodríguez J, Preciado-Rangel P, Orona-Castillo I, García-Salazar J, García-Hernández J, Orozco-Vidal J (2009). Aplicación de abonos orgánicos en la producción de maíz forrajero con riego por goteo. *Rev Mex Cienc Agríc* 27:329-336.
- Fulkerson WJ, Donaghy DJ (2001). Plant-soluble carbohydrate reserves and senescence—key criteria for developing an effective grazing management system for ryegrass-based pastures: a review. *Aust J Exp Agric* 41(2):261-275
- González-Salas U, Gallegos-Robles MA, Vázquez-Vázquez C, García-Hernández JL, Fortis-Hernández M, Mendoza-Retana SS (2018). Productividad de genotipos de maíz forrajero bajo fertilización orgánica y propiedades físico-químicas del suelo. *Rev Mex Cienc Agríc* 9(spe20):4331-4341.
- Goujon T, Sibout R, Eudes A, MacKay J, Jouanin L (2003). Genes involved in the biosynthesis of lignin precursors in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiol Biochem* 41:677-687.
- Hernández OB, Sánchez-Hernández ROC, López-Noverola UEB, Pérez-Méndez MA (2017). Uso de compostas para mejorar la fertilidad de un suelo Luvisol de ladera. *Rev Mex Cienc Agríc* 8(6):1273-1285.
- Hernández T, García C, Ingelmo F, Bernal M, Clemente R, Cabrera F, Madejón E, Cabrera A, Cox L (2014). Residuos orgánicos en la restauración/rehabilitación de suelos degradados y contaminados. De residuo a recurso. El camino hacia la sostenibilidad. III. Recursos orgánicos: Aspectos agronómicos y medioambientales.
- Johnson CR, Reiling BA, Mislevy P, Hall MB (2001). Effects of nitrogen fertilization and harvest date on yield, digestibility, fiber, and protein fractions of tropical grasses. *J Anim Sci* 79(9):2439-2448.
- Lazcano C, Domínguez J (2011). The use of vermicompost in sustainable agriculture: Impact on plant growth and soil fertility. In: *Soil nutrients*. Nova Science Publishers, pp 1-23.
- Möller K, Müller T (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Eng Life Sci* 12(3):242-257. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100085>
- Oleszek M, Matyka M (2017). Nitrogen fertilization level and cutting affected lignocellulosic crops properties important for biogas production. *Bioresources*.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) (2009). *The bioeconomy to 2030: Designing a policy agenda*. OECD Publishing.
- Poole N, Donovan J, Erenstein O (2020). Investigación en agronomía: reevaluando la contribución del maíz y el trigo a la nutrición y la salud humanas. *Food Policy* 16:101976. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101976>
- Recep IN, Veyis T (2019). Influences of nitrogen fertilization and harvest time on combustion quality of four perennial grasses in a semi-arid Mediterranean climate. *Ind Crops Prod* 128:239-247.
- Rouquette FM Jr, Sollenberger LE, Vendramini JMB (2023). Grazing management and stocking strategy decisions for pasture-based beef systems: experimental confirmation vs. testimonials and perceptions. *Transl Anim Sci*. 2023 Jun 28;7(1).
- Salas-Pérez L, Borroel-García VJ, Ramírez-Aragón MG, Moncayo-Luján MR (2018). Efecto de la adición de ácido ascórbico y té de composta en la producción y capacidad antioxidante de forraje hidropónico de maíz. *Nova Scientia* 10(20):47-63.
- Santiago-Ortega MA, Honorato-Salazar JA, Quero-Carrillo AR, Hernández-Garay A, López-Castañeda C, López-Guerrero I (2016). Biomasa de *Urochloa brizantha* cv. Toledo como materia prima para la producción de bioetanol. *Agrociencia* 50(6):711-726.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2018).
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2019).
- Suárez BJ, Van-Reenen CG, Stockhofe N, Dijkstra J, Gerrits WJJ (2007). Effect of roughage source and roughage to concentrate ratio on animal performance and rumen development in veal calves. *J Dairy Sci* 90(5):2390-2403.
- Tilvikienė V, Šlepetienė A, Kadžiulienė Ž (2017). Effects of 5 years of digestate application on biomass production and quality of cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.). *Grass Forage Sci* 73(1):206-217.
- Ventura-Ríos J, Santiago-Ortega MA, Maldonado-Peralta MA, Álvarez-Vázquez P, Maldonado-Peralta R, Barrera-Martínez I, Wilson-García CY (2021). Biomasa de *Urochloa humidicola* como materia prima para producir biocombustible. *Rev Fitotec Mex*.
- Villalobos-Villalobos LA, WingChing-Jones R (2019). Remoción mecánica del material senescente para la recuperación de pasturas. *Agron Mesoam* 30(3):821-840. <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.36625>



El papel de la microgravedad en el desarrollo de fármacos

Nahum Galindo Vargas

Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Instituto Politécnico Nacional.

correo: ngalindov2000@alumno.ipn.mx



RESUMEN

Para identificar la estructura tridimensional de las proteínas por difracción de rayos X es esencial su cristalización. Este paso es importante para dilucidar las interacciones proteína-proteína de la membrana celular y desarrollar fármacos específicos que inhiban estas interacciones. Sin embargo, las pequeñas diferencias en la concentración de las soluciones proteicas saturadas utilizadas para el crecimiento de los cristales afectan la pureza del cristal obtenido. Estas diferencias de concentración son inducidas a nivel microscópico por la sedimentación y las corrientes de convección, consecuencia del campo gravitatorio terrestre. La investigación ha recurrido a una nueva frontera: la microgravedad en el espacio para la obtención de cristales de alta pureza, de mejor calidad a los obtenidos en la Tierra.

Palabras clave: cristalografía de rayos X, gravedad cero, microgravedad, fármacos inhibidores de interacciones proteína-proteína, Estación Espacial Internacional

ABSTRACT

Crystallization is essential to identify the three-dimensional structure of proteins by X-ray diffraction. This step is important to elucidate the protein-protein interactions of the cell membrane and to develop specific drugs that inhibit these interactions. However, small differences in the concentration of the saturated protein solutions used for crystal growth affect the purity of the crystal obtained. These concentration differences are induced at the microscopic level by sedimentation and convection currents, a consequence of the earth's gravitational field. Research has turned to a new frontier: microgravity in space to obtain high-purity crystals of better quality than those obtained on Earth.

Keywords: X-ray crystallography, zero gravity, microgravity, protein-protein interaction inhibitor drugs, International Space Station

INTRODUCCIÓN

Además de su papel estructural, las proteínas poseen diversas funciones: las enzimas catalizan reacciones químicas, actúan como receptores en la comunicación celular y como anticuerpos en la respuesta inmunitaria (J. Karr et al. 2015). Más del 50% de fármacos modernos se centran en interrumpir la comunicación celular, inhibiendo la interacción entre la porción peptídica de la proteína señalizadora y su receptor en la membrana celular, como los anticancerígenos y anti-neurodegenerativos (J. Karr et al. 2015; Scott et al. 2016). Por ejemplo, los fármacos anticancerígenos se unen a los receptores proteicos de células cancerosas que secuestran a las proteínas que regulan la muerte celular, induciendo así su destrucción (Scott et al. 2016).

Para desarrollar fármacos que bloqueen los sitios de unión entre proteínas es necesario dilucidar la estructura tridimensional de la proteína receptora. La cristalografía de rayos X es una de las herramientas más utilizadas para descifrar la estructura de una proteína (Scott et al. 2016). Para esto, las proteínas deben formar cristales de tamaño adecuado y pureza elevada a partir de una solución saturada de proteína, lo que es muy complicado en la Tierra debido a la influencia del campo gravitatorio a escala microscópica (En Kim 2022). Esto ha motivado a exportar la experimentación hacia una nueva dirección: la microgravedad en la órbita terrestre, donde se han obtenido cristales de mayor volumen y resolución en la difracción de rayos X (J. Karr et al. 2015) (Figura 1).

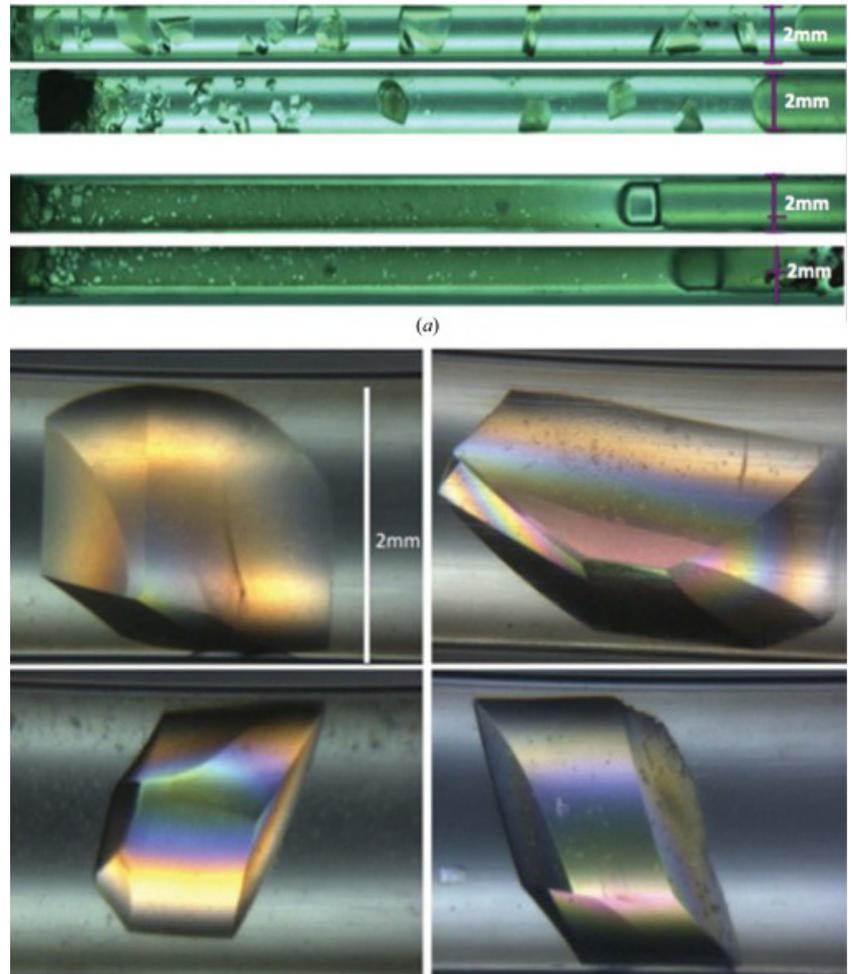


Figura 1. a) Crecimiento de un cristal de proteína en la microgravedad (arriba) y en la Tierra (abajo) bajo las mismas concentraciones y protocolos, dentro de tubos capilares de 2 mm de diámetro. b) cristales de proteínas obtenidas en la microgravedad vistas bajo luz polarizada. Imagen tomada de Ng, et al., 2015.

2

LA MICROGRAVEDAD

La microgravedad, también conocida como gravedad cero, es un concepto utilizado para describir la ingravidez experimentada en los vuelos espaciales, dada por una aparente falta de aceleración gravitatoria ("g" en tus clases de física) con respecto al vehículo espacial (Klaus 2023). En términos llanos, esto significa que no caerás dentro de la nave. La gravedad cero se percibe cuando caes hacia la Tierra a la misma velocidad a la que eres desplazado por la órbita terrestre; es decir, experimentas una caída libre pero al mismo tiempo eres desplazado tangencialmente alrededor de la Tierra, sin salir de la órbita terrestre, por lo que en realidad no caes.

A 400 km de la superficie terrestre se encuentra la Estación Espacial Internacional (ISS por sus siglas en inglés), circundando al planeta en una órbita "baja" a una velocidad de 28 000 km/h (En Kim 2022). En la ISS se experimenta un 90% de la gravedad de la Tierra, pero la sensación es de ingravidez porque la estación está en caída libre constante mientras recorre la órbita terrestre. Conviene aclarar que la microgravedad no significa que la aceleración gravitatoria haya disminuido o desaparecido; tampoco tiene que ver con el prefijo micro ($\mu=1 \times 10^{-6}$) que expresa una millonésima parte, ni con modificación alguna a la constante gravitatoria universal G, de la famosa ley de gravitación universal de Newton (Klaus 2023).



3

CAMBIOS MACROSCÓPICOS Y MICROSCÓPICOS EN LA MICROGRAVEDAD

Al derramar agua en la gravedad cero, esta no fluye hacia el suelo como normalmente sucede en la Tierra, sino que queda suspendida como una gota enorme por la fuerza de unión entre las moléculas del agua, fenómeno conocido como tensión superficial. Al encender una flama en la microgravedad esta toma una forma esférica, distinta a la característica forma que observamos en una

vela encendida (Brazil 2018). En la Tierra la combustión se lleva a cabo por difusión del oxígeno hacia la flama y convección de los gases de combustión, con la zona más fría en la parte baja de la flama y la zona caliente en la parte superior. Pero en la ingravidez, la combustión se lleva a cabo lentamente por difusión del oxígeno, por lo que la flama adquiere una forma esférica.

Pero ¿qué sucede a nivel microscópico en una solución de proteínas por efecto de la gravedad? La gravedad terrestre induce el movimiento de estas macromoléculas en solución, produciendo pequeñas corrientes convectivas. A este fenómeno se le conoce como convección impulsada por la flotabilidad. Un ejemplo del efecto de las corrientes convectivas a nivel macroscópico se observa en la agrupación de los residuos en ciertas zonas en el fondo de una alberca. Además de esto, la gravedad también promueve la sedimentación. Por ejemplo, una



solución turbia de tierra fina se aclara después de unos días de reposo. Ambos fenómenos provocan la formación de gradientes (diferencias) en la concentración de una solución. Sin embargo, en la microgravedad desaparecen la convección y la sedimentación, y se mantiene solo la difusión, lo que reduce los gradientes de concentración en la solución (J. Karr et al. 2015).

4

CRISTALIZACIÓN DE PROTEÍNAS EN LA MICROGRAVEDAD



En la microgravedad las soluciones proteicas son más homogéneas. En un laboratorio terrestre, por ejemplo, una solución saturada de proteína contenida en tubo eppendorf (tubos cónicos de plástico) puede tener una concentración de un 95% en la zona superficial y de 105% en el fondo del tubo por los fenómenos de convección y sedimentación (En Kim 2022). Sin embargo, la diferencia en la concentración para esta misma solución se reduce a 99.9% y 100.1% en la microgravedad. Esta ventaja se ha utilizado para obtener cristales de proteínas con una alta pureza, de mayor tamaño a los obtenidos en la Tierra y con mayor resolución en los resultados de difracción de rayos X (J. Karr et al. 2015).

Durante el crecimiento de cristales se genera una diferencia de concentraciones entre la solución proteica saturada y la zona alrededor del cristal, conocida como zona de agotamiento, con una menor concentración de proteínas. Esta diferencia de concentraciones implica un gradiente de densidades, lo que provoca la formación de corrientes de convección por flotabilidad en presencia de la gravedad terrestre. Las corrientes convectivas incorporan moléculas de proteínas de forma turbulenta y desordenada al cristal, ocasionando defectos estructurales (Kundrot et al., 2001). Pero en la micro-

gravedad las corrientes convectivas se reducen enormemente, por lo que el cristal solo crece por difusión. Esto favorece un ordenamiento más preciso de las proteínas y el crecimiento lento y controlado del cristal. Se reduce así la incorporación de unidades mal orientadas, obteniéndose un mayor orden cristalino (Kundrot et al., 2001).

Por si fuera poco, las corrientes convectivas pueden desprender pequeños agregados del cristal, generando nuevos núcleos, fenómeno conocido como nucleación secundaria (Kundrot et al., 2001). En la microgravedad también se reduce la nucleación secundaria, lo que produce la formación de menos cristales, pero de mayor tamaño y mejor ordenados (figura 1). Además, durante el crecimiento de un cristal en la Tierra, este tiende a sedimentarse por efecto de la gravedad. Cuando el cristal toca el fondo o a las paredes del tubo capilar donde se lleva a cabo el experimento, su crecimiento deja de ser uniforme en todas sus caras, lo que afecta la forma del cristal (Kundrot et al., 2001). En la microgravedad los cristales formados se mantienen suspendidos en la solución, por lo que su crecimiento es más simétrico. Un crecimiento lento y simétrico conduce a la formación de cristales con menos defectos estructurales, de mayor calidad para los estudios de cristalografía de rayos X (Kundrot et al., 2001).

En 1981 se cristalizó la enzima β -galactosidasa en un ambiente de gravedad cero a bordo de un cohete sonda alemán, el primer experimento de este tipo. De acuerdo con el Foro de la Ciencia del Programa de la ISS, el crecimiento de cristales de proteínas, con más de 500 experimentos hasta el año 2021, es por mucho el principal tipo de experimentos realizados dentro de la ISS (National Aeronautics and Space Administration (NASA) et al., 2022). En la figura 2 se indican solo unos cuantos ejemplos representativos de cristalización de proteínas con ayuda de la microgravedad la Estación Espacial Rusa Mir.

La Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA por sus siglas en inglés) lleva más de 20 años trabajando en la cristalización de proteínas para el desarrollo de fármacos anticancerígenos, contra enfermedades dentales y la distrofia muscular de Duchenne, una enfermedad de origen genético (NASA et al., 2022). Aunque aún no se han revelado más detalles, se sabe que algunos fármacos están en ensayos preclínicos. Con la cristalización de proteínas también se ha identificado que el receptor proteico donde se unen los fármacos para tratar la tuberculosis llega a cambiar su diámetro. Esta característica dificulta su tratamiento, pero ha dado pistas para el desarrollo de mejores tratamientos. La empresa farmacéutica Bristol Myers Squibb ha trabajado en la cristalización de proteínas en la microgravedad desde los años 90's y, en el año 2017, Merck envió al espacio su fármaco anticancerígeno Keytruda, anticuerpos monoclonales de administración intravenosa, para su cristalización (En Kim 2022; Merck 2022). Los cristales obtenidos fueron más homogéneos y de mayor pureza, lo que incrementa la estabilidad y solubilidad del fármaco, facilita su administración intramuscular y reduce costos para su aplicación.

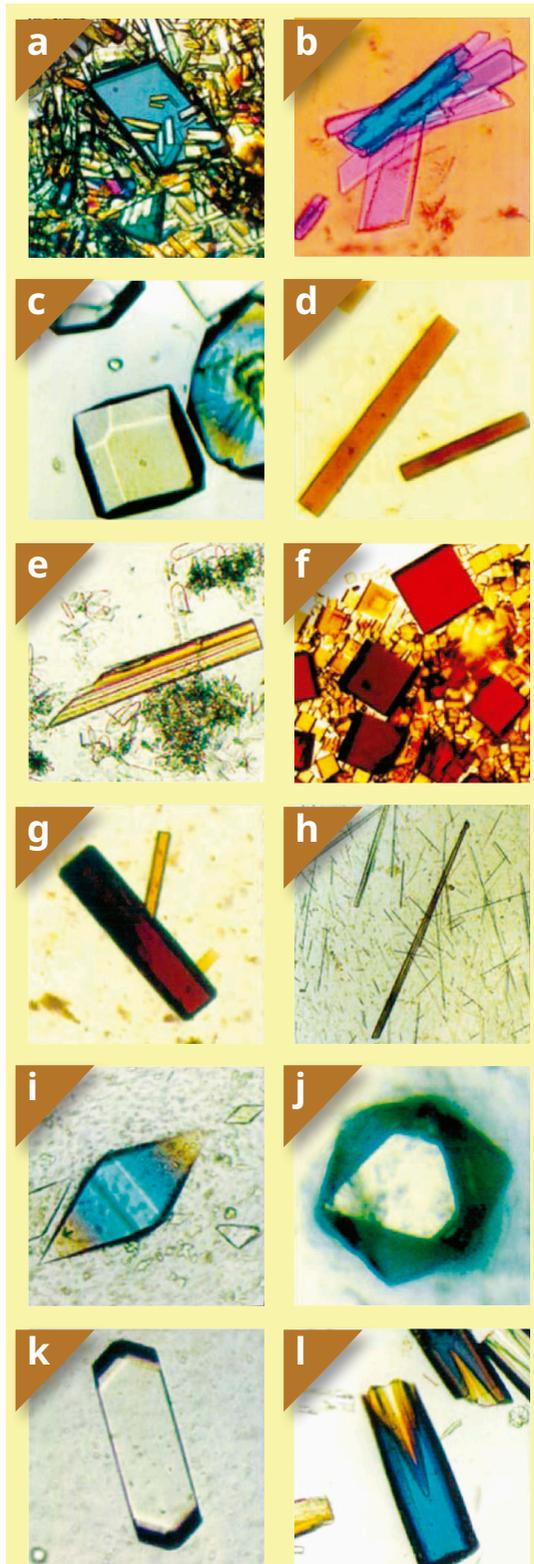


Figura 2. Algunos ejemplos de proteínas cristalizadas en un ambiente de microgravedad dentro de la Estación Espacial Rusa Mir: a) canavalina romboédrica, (b) creatina quinasa, (c) lisozima, (d) catalasa bovina, (e) α -amilasa porcina, (f) catalasa fúngica, (g) mioglobina, (h) concanavalina B, (i) taumatina, (j) apoferritina, (k) virus satélite del mosaico del tabaco, y (l) canavalina hexagonal. Imagen tomada de McPherson y DeLucas, 2015.

5

CONCLUSIÓN

Además de los altos costos de trasladar un experimento a las alturas y la larga lista de espera para acceder a ocupar un espacio en la ISS, no todos los experimentos son exitosos. Por este motivo se han buscado algunas alternativas que simulan la microgravedad en la Tierra, como las torres de caída libre, los vuelos parabólicos y los cohetes sonda, con la desventaja de que los tiempos de duración del efecto de la microgra-

vedad son muy cortos, desde segundos a unos cuantos minutos. Por lo pronto, los avances en la identificación estructural de proteínas para el desarrollo de fármacos inhibidores de las interacciones proteína-proteína, apoyados de la tecnología aeroespacial, continuará en tanto existan instalaciones como la ISS, o alternativas que permitan llevar la investigación hacia una nueva frontera biotecnológica: el espacio.

6

AGRADECIMIENTOS

Al Conahcyt por el financiamiento otorgado (2023-000002-01NACF-02641)

REFERENCIAS

Brazil R (2018) Science in microgravity. Chemistry World. Available from <https://www.chemistryworld.com/features/science-in-microgravity/3009826>. article [fecha de revisión 10 febrero 2025]

En Kim S (2022). Pharma looks up. C&EN Global Enterprise 100(40):18-23.

J Karr L, Y Miller T, N Donovan D (2015) A Researcher's Guide to: Macromolecular Crystal Growth. National Aeronautics and Space Administration. Available from https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/05/np-2015-08-027-jsc_macromolecular_crystals-iss-mini-book-102715-508c.pdf [fecha de revisión 10 febrero 2025]

Klaus DM (2023) Microgravity. In Encyclopedia of Astrobiology. Edited by M Gargaud, WM Irvine, R Amils, P Claeys, HJ Cleaves, M Gerin, D Rouan, T Spohn, S Tirard, M Viso. Springer Berlin Heidelberg. 1942-1943 pp.

Kundrot CE, Judge RA, Pusey ML, Snell EH (2001) Microgravity and Macromolecular Crystallography. *Crystal Growth & Design* 1(1):87-99.

McPherson A, DeLucas LJ (2015). Microgravity protein crystallization. *Npj Microgravity* 1(1):15010. doi: 10.1038/npjmgrav.2015.10

Merck (2022) Proteins in space: Taking our research to the final frontier. Innovation [online]. Available from <https://www.merck.com/stories/proteins-in-space-taking-our-research-to-the-final-frontier/> [fecha de revisión 10 febrero 2025]

National Aeronautics and Space Administration (NASA), Canadian Space Agency (CSA), European Space Agency (ESA), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), State Space Corporation, ROSCOSMOS (ROSCOSMOS), Italian Space Agency (ASI) (2022). International Space Station Benefits for Humanity 2022. International Space Station Program Science Forum. Available from <https://www.nasa.gov/missions/station/all-editions-of-international-space-station-benefits-for-humanity/>

merck.com/stories/proteins-in-space-taking-our-research-to-the-final-frontier/ [fecha de revisión 10 febrero 2025]

Ng JD, Baird J K, Coates L, Garcia-Ruiz JM, Hodge TA, Huang S (2015). Large-volume protein crystal growth for neutron macromolecular crystallography. *Acta Crystallographica Section F Structural Biology Communications* 71(4):358-370. doi:10.1107/S2053230X15005348

Scott DE, Bayly AR, Abell C, Skidmore J (2016) Small molecules, big targets: Drug discovery faces the protein-protein interaction challenge. *Nature Reviews Drug Discovery* 15(8):533-550.





JABONES ARTESANALES CON EXTRACTOS ANTIOXIDANTES: entre ciencia, tradición y beneficios para la piel.

Naella Sandivel Valencia Pérez ^{*1}, Genaro Iván Cerón Móntes ¹.

¹Centro de Cooperación Academia Industria, Universidad Tecnológica de Tecámac. Carretera Federal México-Pachuca km 37.5, Predio Sierra Hermosa, Tecámac Edo. Méx.

Autor de correspondencia: naellavalenciap@gmail.com



RESUMEN

Este trabajo explora la elaboración del jabón artesanal como una práctica tradicional con fundamentos científicos. Se describen los procesos de saponificación, el papel de los ácidos grasos en las propiedades físicas del jabón y la importancia del índice de saponificación para el desarrollo de fórmulas equilibradas. Asimismo, se analiza la incorporación de extractos vegetales ricos en antioxidantes y su estabilidad durante el curado. Se destaca el potencial de estos jabones en el cuidado de la piel, y se reconoce que existe un amplio campo de estudio para validar científicamente sus beneficios antioxidantes a largo plazo.

Palabras clave: Jabón artesanal, saponificación, ácidos grasos, álcali y antioxidantes

ABSTRACT

This work explores the elaboration of handcrafted soap as a traditional practice supported by scientific principles. It describes the saponification process, the role of fatty acids in the physical properties of soap, and the importance of the saponification index for developing balanced formulations. The inclusion of plant extracts rich in antioxidants and their stability during the curing stage is also discussed. The potential of these soaps in skin care is highlighted, and it is acknowledged that there is a broad field of research to scientifically validate their long-term antioxidant benefits.

Keywords: Handmade soap, saponification, fatty acids, alkali, and antioxidants.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los jabones artesanales elaborados con extractos naturales han ganado una notable popularidad en México, tanto entre consumidores que buscan productos más amigables con su piel, como entre emprendedores que encuentran en su fabricación una opción creativa y rentable. Su elaboración puede realizarse mediante saponificación en frío o en caliente, lo que permite una gran versatilidad en el uso de ingredientes y en las propiedades cosméticas del producto final.

Más allá de su valor estético y artesanal, estos jabones destacan por incorporar compuestos bioactivos como los polifenoles, presentes en extractos vegetales, que actúan como antioxidantes naturales capaces de combatir el daño oxidativo y retrasar el envejecimiento cutáneo

(Rambabu *et al.*, 2020). La calidad del jabón también está determinada por los ácidos grasos presentes en los aceites utilizados, ya que estos influyen directamente en su dureza, textura, capacidad de formación de espuma y suavidad al tacto (Febriani *et al.*, 2021).

Este artículo ofrece una visión integral sobre la evolución del jabón, los métodos tradicionales de fabricación artesanal, la relevancia de los ácidos grasos en su formulación y el potencial de los antioxidantes naturales como aditivos funcionales. Se analizan también los desafíos que plantea su incorporación, como la estabilidad durante el curado, y se destaca la necesidad de más estudios que respalden científicamente sus beneficios a largo plazo en la salud de la piel.

2 LA HISTORIA DEL JABÓN

El jabón ha acompañado a la humanidad por más de 3,000 años, aunque su origen exacto es incierto. Los primeros registros escritos datan del 2800 a.C. en Babilonia, donde se usaba una mezcla de grasas y cenizas para limpiar textiles y con fines medicinales. Una leyenda romana sugiere que fue descubierto accidentalmente en el Monte Sapo, cuando las grasas animales de los sacrificios se mezclaron con cenizas y fueron arrastradas por la lluvia, creando una sustancia jabonosa en las orillas del río Tíber (Routh *et al.*, 1996).

El término "soap" proviene del latín *sapo* (P&G, 1881);(P&G, 1990);(Routh *et al.*, 1996), nombre que los celtas daban a su mezcla de grasa animal y cenizas vegetales.

Aunque griegos y romanos preferían los aceites para el aseo personal, eventualmente adoptaron la técnica jabonera de los pueblos del norte de Europa (Heredity, 1891). Durante la Edad Media, la fabricación de jabón evolucionó a partir de la cocción de grasas y cenizas en agua, manteniéndose como un proceso artesanal y doméstico en diversas culturas.

El auge de la jabonería en Europa comenzó entre los siglos VII y IX en regiones como Italia y España entre los años 700 y 800 d.C, con la aparición del célebre jabón de Castilla, elaborado a base

de aceite de oliva, cenizas y perfumes naturales (Forbes y Leiden, 1955). A partir del siglo XIII, su producción comenzó a regularse en Inglaterra, donde se gravó con impuestos, lo que impulsó una fabricación más controlada y con fines comerciales (Routh *et al.*, 1996).

Hasta la Edad Media, la fabricación de jabón se basó en la cocción de cenizas de plantas y grasas en agua, proceso que evolucionó con el tiempo (Forbes y Leiden, 1955). En el siglo XIX, América del Norte llevó la producción del jabón de lo artesanal a lo industrial, recolectando grasas de desecho y elaborándolo en grandes calderas al aire libre, como se muestra en la Figura 1. El jabón resultante se vertía en moldes de madera, se cortaba en barras y se dejaba curar antes de ser comercializado por vendedores ambulantes. Este proceso marcó la transición de un producto artesanal a un artículo de consumo masivo (P&G, 1881)(P&G, 1990).

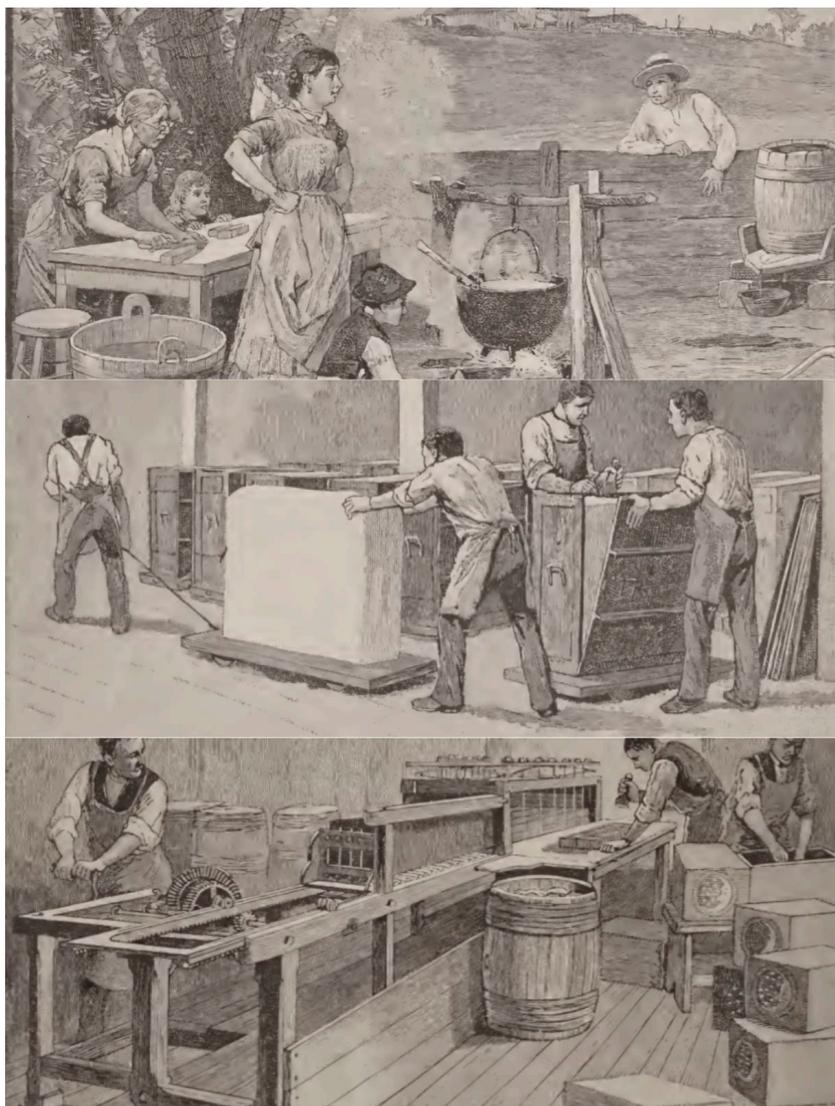


Figura 1. Proceso industrial temprano de fabricación de jabón en Procter & Gamble, Cincinnati, U.S.A. La imagen muestra tres etapas clave del proceso de producción de jabón a finales del siglo XIX: (1) la cocción al aire libre de grasas y álcalis en grandes calderas, (2) el vaciado del jabón fundido en moldes rectangulares para formar bloques sólidos, y (3) el corte manual de estos bloques en barras más pequeñas para su distribución y venta. Fuente: (P&G, 1881)



3

MÉTODOS DE ELABORACIÓN DE JABÓN ARTESANAL

Existen tres métodos principales para la fabricación de jabones artesanales, cada uno de ellos varía en complejidad, tiempo de elaboración y características del producto final.

3.1 Jabón a partir de base de glicerina

Este método emplea una barra de jabón preelaborada, de color blanco o translúcida y sin aroma, que se funde a baño maría y se mezcla con esencias, colorantes y extractos naturales. Luego, se vierte en moldes hasta solidificar (Borkar, 2023). Es una técnica sencilla y segura, ideal para principiantes, ya que no implica el manejo

de sustancias cáusticas. Una de sus principales ventajas es que el jabón puede utilizarse en menos de dos horas tras su solidificación. Sin embargo, su formulación depende de una base comercial cuyo contenido no siempre es totalmente personalizable.

3.2 Saponificación en frío

La saponificación en frío es un proceso que ocurre a temperatura ambiente y consiste en mezclar ácidos grasos con un álcali (hidróxido de sodio, NaOH, o hidróxido de potasio, KOH) hasta que se produce la reacción de saponificación, generando una mezcla de consistencia viscosa. En esta reacción, las grasas o aceites reaccionan con el álcali para formar jabón y glicerina (Borkar, 2023). En este punto, se agregan extractos de plantas, aceites esenciales y fragancias sin que estos se degraden por el calor.

Una vez vertida en moldes, la mezcla debe reposar durante al menos 24 horas para solidificar y, posteriormente, pasar por un proceso de curado de aproximadamente cuatro semanas. Este periodo permite que el álcali se neutralice y sea seguro para la piel, que el exceso de agua se evapore, que la textura y consistencia mejoren, que el pH se estabilice entre 8 y 10, y que el jabón desarrolle un mejor rendimiento en espuma y limpieza. A pesar de su mayor duración, este método permite un control total sobre la formulación y la calidad final del producto (Félix *et al.*, 2017).





3.3 Saponificación en caliente

Este método acelera la reacción de saponificación mediante la aplicación de calor, reduciendo el tiempo de producción. Al igual que en la saponificación en frío, se parte de una mezcla de ácidos grasos con un álcali, usualmente hidróxido de sodio (NaOH). Esta mezcla se calienta en baño maría o en una olla de cocción lenta, alcanzando temperaturas entre 70 y 100 °C. Durante la cocción, debe removerse constantemente hasta alcanzar una textura espesa, similar a un puré de manzana, transformándose gradualmente en una pasta brillante y uniforme.

Tras medir el pH (8-10) y reducir la temperatura, se agregan aditivos sensibles al calor, como aceites esenciales, fragancias o extractos vegetales, cuidando que la temperatura haya descendido lo suficiente para evitar su degradación. Los ingredientes añadidos deben representar entre el 0.5 % y el 3 % del peso total para evitar afectar la dureza y durabilidad del jabón (Rambabu *et al.*, 2020).

Una de sus principales ventajas es que el jabón puede usarse transcurridas 24 horas, ya que el álcali ha reaccionado completamente (Borkar, 2023). Sin embargo, algunos artesanos del jabón recomiendan dejarlo secar de una a dos semanas para mejorar su firmeza y duración (Rambabu *et al.*, 2020). La Figura 2 muestra fotografías de jabones producidos mediante los tres métodos descritos, destacando las diferencias en su apariencia y textura.



Figura 2. Tres tipos de jabones artesanales elaborados con distintas técnicas: a) base de glicerina, b) saponificación en frío y c) saponificación en caliente. Las diferencias en textura, firmeza, color y brillo reflejan el impacto del método de elaboración. Los jabones de glicerina, por ejemplo, muestran colores más intensos y acabados brillantes. Fuente: Elaboración propia.

4

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL JABÓN ARTESANAL: ÁCIDOS GRASOS Y SU IMPACTO

Una de las preguntas más comunes entre los fabricantes de jabón artesanal es: ¿Qué cantidad de álcali se debe agregar a la fórmula? La respuesta es clave, ya que la cantidad de base (NaOH) o (KOH) no solo influye en la seguridad del producto final, sino también en su textura, estabilidad, durabilidad y calidad cosmética. Para determinar correctamente esta cantidad, se emplea el índice de saponificación, que indica los gramos de (NaOH) o (KOH) necesarios para saponificar un gramo de un ácido graso específico ver tabla 1 (Santos *et al.*, 2020); (Jiménez *et al.*, 2001); (Benjumea *et al.*, 2004); (Chavez, 2020); (Baque *et al.*, 2023). La Tabla 1 muestra ejemplos representativos de índices de saponificación de diferentes aceites y grasas comunes en la jabonería artesanal. Además, el tipo de álcali utilizado define la textura del producto:

mientras que el NaOH produce jabones sólidos, el KOH se emplea para obtener jabones líquidos o más suaves (Prieto *et al.*, 2018).

Los ácidos grasos, componentes principales de los aceites vegetales y grasas animales, son las moléculas responsables de la formación del jabón (ver Figura 3). Su estructura está compuesta por largas cadenas de átomos de carbono e hidrógeno con un grupo carboxilo (-COOH) en uno de sus extremos. Se clasifican, en función de su estructura química, en saturados e insaturados, y esta clasificación influye directamente en las propiedades físicas del jabón, como su dureza, estabilidad y capacidad de hidratación (Cavalheiro *et al.*, 2023); (Ivanova *et al.*, 2022).

Tipo de ácido graso	Fuentes Principales	Estado Físico del Jabón	Dureza	Espuma	Hidratación	Índice de Saponificación		Referencia
						(gramos de NaOH por cada gramo de ácido graso)	(gramos de KOH por cada gramo de ácido graso)	
Ácido Láurico (Saturado)	Aceite de coco	Sólido	alta	abundante	baja	0.170	0.239	(Santos <i>et al.</i> , 2020)
Ácido Palmítico (Saturado)	Aceite de palma	Sólido	alta	baja	baja	0.138	0.194	(Benjumea <i>et al.</i> , 2004)
Ácido Oleico (Monoinsaturado)	Aceite de aguacate	Líquido	media	cremosa	media	0.134	0.189	(Jiménez <i>et al.</i> , 2001)
Ácido Linoleico (Poliinsaturado)	Aceite de linaza	Líquido	baja	suave	alta	0.79	0.112	(Chavez, 2020)
Ácido Linolénico (Poliinsaturado)	Aceite de chía	Líquido	baja	suave	alta	0.87	0.113	(Chavez, 2020)
Ácido Ricinoleico (Monoinsaturado)	Aceite de ricino	Líquido	media	densa	alta	0.131	0.169	(Baque <i>et al.</i> , 2023)

Tabla 1. Relación entre el tipo de ácido graso, sus fuentes y propiedades cosméticas del jabón artesanal, junto con los índices de saponificación requeridos.

Ácidos grasos saturados



Ácidos grasos insaturados



Fuentes vegetales usados en jabonería artesanal

Figura 3. Fuentes vegetales de ácidos grasos saturados e insaturados usados en jabonería artesanal. Los saturados aportan dureza y estabilidad; los insaturados, suavidad e hidratación. Fuente: Elaboración propia.

4.1 Tipos de ácidos grasos y su función en el jabón

Ácidos grasos saturados: No presentan dobles enlaces y son sólidos a temperatura ambiente. Aportan mayor dureza, buena formación de espuma compacta y alta estabilidad oxidativa al jabón. Son ideales para mejorar la vida útil del producto. Los ácidos grasos insaturados: Presentan uno o más dobles enlaces en su cadena y son líquidos a temperatura ambiente. Se dividen en dos grupos:

- **Monoinsaturados:** Poseen un solo doble enlace. Aportan suavidad, emoliencia e hidratación, sin comprometer tanto la estabilidad del producto.
- **Poliinsaturados:** Contienen dos o más dobles enlaces. Contribuyen a la nutrición y regeneración de la piel, pero son más propensos a oxidarse y enranciarse, por lo que deben emplearse en menor proporción o estabilizarse con antioxidantes como la vitamina E (Zahran, 2024).

Para lograr una formulación equilibrada, se recomienda combinar distintos tipos de ácidos grasos, con énfasis en mantener un balance entre dureza, limpieza, suavidad e hidratación. En especial, los aceites con alto contenido de poliinsaturados deben emplearse con precaución, complementándolos con antioxidantes naturales o sintéticos que eviten su degradación (Zahran, 2024).





EL PAPEL DE LOS ANTIOXIDANTES EN LOS JABONES ARTESANALES

Los antioxidantes son compuestos esenciales en la elaboración de jabones artesanales, especialmente cuando se emplean aceites ricos en ácidos grasos insaturados. Estos compuestos, si bien aportan suavidad e hidratación a la piel, son más susceptibles al proceso de oxidación, lo que puede llevar al enranciamiento del jabón, reducción en su calidad cosmética, alteración del color y mal olor (Ahmad *et al.*, 2018); (Adigun *et al.*, 2019).

Los antioxidantes actúan como agentes estabilizantes, al prevenir o retardar la oxidación de los lípidos presentes en la fórmula. Su incorporación en la fase final del proceso de saponificación, ya sea en frío o caliente, protege los compuestos más sensibles como los aceites esenciales, extractos botánicos y vitaminas, los cuales pueden perder eficacia o degradarse si se exponen a temperaturas elevadas o a un entorno alcalino por tiempo prolongado (Phansi *et al.*, 2024)(Zahran, 2024). Este efecto puede mitigarse con el uso adecuado de antioxidantes, como los que se observan en la Figura 4.

Fuente natural	Método de elaboración artesanal	% de extracto natural utilizado	Referencia
Café arábigo, hojas de morera y café molido	Base de jabón de glicerina	No indica	(Phansi <i>et al.</i> , 2024)
Ciruela roja y negra	Saponificación en caliente	5%	(Febriani <i>et al.</i> , 2021)
Residuos de jarabe de dátil (DSW)	Saponificación en frío	3%	(Rambabu <i>et al.</i> , 2020)
Bayas silvestres (baya de perdiz y romero)	Saponificación en frío	0.05%	(Adigun <i>et al.</i> , 2019)
Hojas de palma aceitera en polvo (OPAL)	Saponificación en caliente	0.1% y 0.5%	(Adigun <i>et al.</i> , 2018)

Tabla 2. Extractos antioxidantes de plantas utilizadas para la elaboración de jabones artesanales.



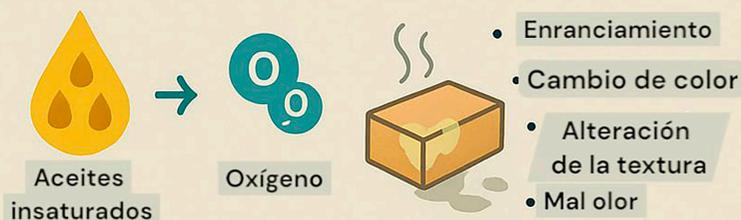
Los antioxidantes utilizados pueden ser de origen natural o sintético. Entre los más comunes es la vitamina E (tocoferol). Se incorpora en pequeñas cantidades (0.5–1%) para prevenir el enranciamiento de aceites ricos en poliinsaturados como el de semilla de uva, girasol o linaza (Zahran, 2024). Algunos de estos antioxidantes naturales, sus fuentes y efectos se resumen en la Tabla 2.

En formulaciones más técnicas o comerciales, pueden utilizarse antioxidantes sintéticos como BHT (butilhidroxitolueno) o BHA (butilhidroxianisol), aunque su uso ha sido objeto de discusión debido a posibles efectos adversos, por lo cual muchas formulaciones artesanales los evitan (Ahmad et al., 2018);(Adigun et al.,2019).

La eficacia de los antioxidantes no solo depende de su tipo, sino también del momento y forma en que se agregan a la mezcla. Idealmente, deben incorporarse al final del proceso de mezcla, justo antes de verter en moldes, para evitar su descomposición. Además, el almacenamiento en recipientes opacos y herméticos contribuye a prolongar la estabilidad del producto.

El papel de los antioxidantes en los jabones artesanales

¿Por qué se oxidan los jabones?



¿Cómo actúan los antioxidantes?



Agregar al final del proceso de saponificación



Antioxidantes naturales comunes

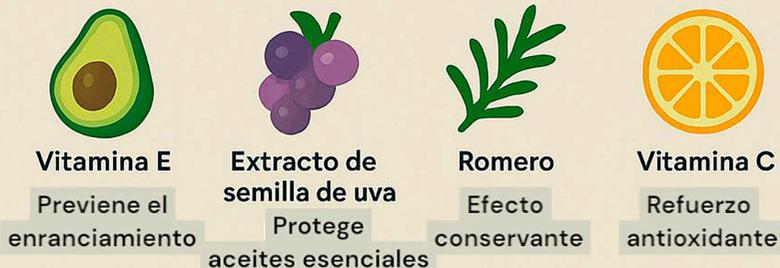


Figura 4. Antioxidantes naturales usados en jabonería artesanal para prevenir el enranciamiento de aceites ricos en ácidos grasos insaturados. Su incorporación protege compuestos sensibles como aceites esenciales y extractos botánicos, preservando las propiedades cosméticas del jabón. Se recomienda agregarlos al final del proceso para evitar su degradación por calor o alcalinidad.

Fuente: Elaboración propia.



6 CONCLUSIÓN

La elaboración de jabones artesanales combina tradición y ciencia para crear productos sustentables, seguros y personalizados. Los métodos de saponificación en frío, caliente y con base de glicerina ofrecen opciones accesibles, cada una con ventajas en tiempo, control de ingredientes y propiedades cosméticas.

El uso de extractos naturales y antioxidantes como la vitamina E mejora la estabilidad y funcionalidad del jabón, aunque aún se requiere validar sus efectos a largo plazo. La jabonería artesanal es una vía para conectar ciencia, bienestar y cultura, con potencial biotecnológico y económico.

7 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de Tecámac (UTTEC) por su apoyo al contribuir al desarrollo de una línea de investigación en este campo. Asimismo, se reconoce al emprendimiento de cosmética natural "Naella" por proporcionar las fotografías de sus productos, enriqueciendo la presentación de este trabajo.



REFERENCIAS

Adigun, O., Manful, C., Vidal, N. P., Mumtaz, A., Pham, T. H., Stewart, P., Nadeem, M., Keough, D., & Thomas, R. (2019). Use of natural antioxidants from newfoundland wild berries to improve the shelf life of natural herbal soaps. *Antioxidants*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/antiox8110536>

Ahmad, N., Hasan, Z. A. A., Muhammad, H., Bilal, S. H., Yusof, N. Z., & Idris, Z. (2018). Determination of total phenol, flavonoid, antioxidant activity of oil palm leaves extracts and their application in transparent soap. *Journal of Oil Palm Research*, 30(2), 315–325. <https://doi.org/10.21894/jopr.2018.0010>

Baque P, G., Intriago F, A., García M., S., Burgos B., G., & García V., G. (2023). Epoxidación de aceite de higuera (Ricinus communis) De la provincia de manabí-ecuador. *InfoANALÍTICA*, 11(1), 9–30. <https://doi.org/10.26807/ia.v11i1>.

Benjumea, P., Agudelo, J., & Cano, G. (2004). Estudio Experimental De Las Variables Que Afectan La Reacción Transesterificación Del Aceite Crudo De Palma Para La Producción De Biodiesel. *Scientia et Technica*, 24, 169–174.

Borkar, D. (2023). A Research on Formulation and Evaluation of Herbal Soap. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 4(12), 4360–4367. <https://doi.org/ISSN 2582-7421>

Cavalheiro, N., Stadler, J. P., Giusti, E. D., Chendynski, L. T., & Gomes, S. I. A. A. (2023). Ecological soap production using green chemistry principles. *Acta Scientiarum - Technology*, 46(2004), 1–10. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v46i1.64409>

Chavez, E. V. (2020). *Physicochemical properties of oils from Salvia hispánica L., Linum usitatissimum and Plukenetia volubilis L.* 3(3), 42–48.

Febriani, Y., Mierza, V., & Septimar, E. (2021). Comparison Of Formulations And Antioxidant Activity Of Transparent Soap From Red And Black Plum (Prunus domestica L.). *Jurnal Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam LLDikti Wilayah*, 1(2), 29–36. <https://doi.org/e-ISSN 2807-3142>

Félix, S., Araújo, J., Pires, A. M., & Sousa, A. C. (2017). Soap production: A green prospective. *Waste Management*, 66, 190–195. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.036>

Forbes, R.J. Leiden, E. J. B. (1955). Studies in Ancient Technology. *Business History Review*, 3 vols. Pp(30(02)), 238–240. <https://doi.org/doi:10.2307/3111981>

Heredity, S. J. (1891). Heredity, Health and Personal Beauty. *The Journal of the American Medical Association*, XVII(4), 162. <https://doi.org/doi:10.1001/jama.1891.02410820038013>

Ivanova, M., Hanganu, A., Dumitriu, R., Tociu, M., Ivanov, G., Stavarache, C., Popescu, L., Ghendov-Mosanu, A., Sturza, R., Deleanu, C., & Chira, N. A. (2022). Saponification Value of Fats and Oils as Determined from¹H-NMR Data: The Case of Dairy Fats. *Foods*, 11(10), 1–13. <https://doi.org/10.3390/foods11101466>

Jiménez, Elena M., Aguilar, M. Del. R., Zambrano, M. De La L., & Kolar, E. (2001). Propiedades físicas y químicas del aceite de aguacate obtenido de puré deshidratado por microondas. *Revista de La Sociedad Química de México*, 45(2), 89–92.

P&G. (1881). Something about soap. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1, pp. 1–14). Press of Francis Hart & Co. New-York.

P&G. (1990). *Procter & Gamble Company (A)*. 9-854-047, 1–29.

Phansi, P., Raksaphakdee, S., & Duangsrikaew, K. (2024). Study on Antioxidant Activities of Soaps with Coffee Ground Extract and Soaps with Mixed Coffee Ground Extract and Mulberry Leaf Extract. *Science and Engineering Connect*, 47(1), 26–41. <https://doi.org/ISSN 3027-7914>

Prieto Vidal, N., Adeseun Adigun, O., Huong Pham, T., Mumtaz, A., Manful, C., Callahan, G., Stewart, P., Keough, D., & Horatio Thomas, R. (2018). The effects of cold saponification on the unsaponified fatty acid composition and sensory perception of commercial natural herbal soaps. *Molecules*, 23(9), 1–20. <https://doi.org/10.3390/molecules23092356>

Rambabu, K., Edathil, A. A., Nirmala, G. S., Hasan, S. W., Yousef, A. F., Show, P. L., & Banat, F. (2020). Date-fruit syrup waste extract as a natural additive for soap production with enhanced antioxidant and antibacterial activity. *Environmental Technology and Innovation*, 20, 101153. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101153>

Routh, H. B., Bhowmik, K. R., Parish, L. C., & Witkowski, J. A. (1996). Soaps: From the Phoenicians to the 20th century - A historical review. *Clinics in Dermatology*, 14(1), 3–6. [https://doi.org/10.1016/0738-081X\(95\)00101-K](https://doi.org/10.1016/0738-081X(95)00101-K)

Santos, J. C. O., Conceição, M. M., Santos Martins, J., Carlos, J., Santos, O., & Maria Da Conceicao, M. (2020). Comparative Study of Physico-Chemical Properties of Coconut Oil (Cocos nucifera L.) Obtained by Industrial and Artisanal Processes. *Article in BioTechnology: An Indian Journal*, 16(October). [https://doi.org/10.37532/tsbt.2020.16\(3\).210](https://doi.org/10.37532/tsbt.2020.16(3).210)

Zahran, H. A. (2024). From Fat to Foam: The Fascinating World of Soap Chemistry and Technology. *Egyptian Journal of Chemistry*, 67(6), 9–17. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2023.195358.7627>





ARQUEAS HALÓFILAS, LA VIDA EN ROSA

López-Ortega Mayra Alejandra^{a*}, Escalante-Avilés Marianela^{a*}, Rodríguez-Hernández Adriana Inés^a, López-Cuellar Ma del Rocio^a, Hernández-Suárez Evelyn^a, Chavarría-Hernández Norberto^{a*}

^a Cuerpo Académico de Biotecnología Agroalimentaria. Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Av. Universidad km 1, Rancho Universitario, Tulancingo de Bravo, Hidalgo, C.P. 43600, México.

*Autor para correspondencia:

López-Ortega Mayra Alejandra (mayra_lopez@uaeh.edu.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-8199-9279>

Escalante-Avilés Marianela (es467904@uaeh.edu.mx)

<https://orcid.org/0009-0009-2516-9260>

Rodríguez-Hernández Adriana Inés (inesr@uaeh.edu.mx)

<https://orcid.org/0000-0001-6664-9265>

López-Cuellar Ma del Rocio (marocio_lopez@uaeh.edu.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-0672-0805>

Hernández-Suárez Evelyn (he379518@uaeh.edu.mx)

<https://orcid.org/0009-0000-9689-4165>

Chavarría-Hernández Norberto (norberto@uaeh.edu.mx)

<https://orcid.org/0000-0003-3960-7224>



RESUMEN

Las arqueas halófilas (AH) o haloarqueas son microorganismos que viven en lugares salados y condiciones difíciles como ambiente seco, alta exposición al sol, temperaturas extremas (entre 0 y 42 °C) y baja disponibilidad de oxígeno. Para enfrentar estas condiciones, las AH se protegen de varias maneras, por ejemplo, produciendo pigmentos rojizos utilizados como sistemas de protección y reparación celular. Algunas AH producen una capa mucosa que funciona como reserva de agua y nutrientes. Otras AH acumulan plásticos intracelulares como material de reserva, siendo estos "bioplásticos" una alternativa natural a los plásticos del petróleo: *¡con todas sus ventajas, pero sin sus desventajas!* Las aplicaciones de estos compuestos son diversas: elaboración de envases biodegradables, el tratamiento de aguas y suelos contaminados, y en Medicina como sistemas de liberación controlada de fármacos, así como por su actividad antiinflamatoria, antimicrobiana, antiviral y antioxidante.

Palabras clave: *Arquea; Bioplásticos; Exopolisacáridos (EPS); Haloarquea; Polihidroxialcanoatos (PHA).*

ABSTRACT

Halophilic archaea (HA) or haloarchaea are microorganisms that live in salty places and difficult conditions such as dry environments, high sun exposure, extreme temperatures (between 0 and 42 °C), and low oxygen availability. HA protects itself in several ways to cope with these harsh conditions, such as producing reddish pigments that serve as cellular protection and repair systems. Some HA produced a mucoid coating serving as a water and nutrient reservoir. Other HA accumulate intracellular plastics as a reserve material, making these "bioplastics" a natural alternative to petroleum-based plastics: *with all their advantages, but without their disadvantages!* The applications of these compounds are diverse: the production of biodegradable packaging, the treatment of contaminated water and soil, and in medicine as controlled drug-release systems, as well as for their anti-inflammatory, antimicrobial, antiviral, and antioxidant activity.

Keywords: Microalgae, lipids, proteins, carbohydrates

INTRODUCCIÓN

Hasta hace algunos años los lugares hipersalinos como las *Coloradas de Yucatán* en México, el Salar de Uyuni en Bolivia, y el Mar Muerto, así como yacimientos para la obtención de sal de mesa como las salinas de Guerrero Negro en Baja California Sur en México, se consideraban ambientes inhabitables, de hecho, ambientes salinos *muertos*, pues se pensaba que en condiciones extremas de alto contenido de sal, altos niveles de radiación, escasas de nutrientes y poca disponibilidad de agua, la vida no podría prosperar (Oren, 2003).

Desde principios de la década de los 80', se demostró que estos lugares son colonizados por organismos que, no solo *prefieren*, sino que *necesitan* la sal para "vivir", los **halófilos**, etimológicamente definidos como "**amantes de la sal**". Hace más de un siglo, Charles Darwin, al presenciar la coloración de las salinas rosadas mencionaba "*¡Es una sorpresa que algunas criaturas puedan existir en un fluido saturado de salmuera y que se arrastren entre cristales de sulfato de sodio y cal!*" Y así, las primeras descripciones de los halófilos referían a la presencia *bacterias rojas*, sin embargo, más adelante se demostraría que los microorganismos responsables de las coloraciones rojizas en los ambientes salinos (Fig. 1), son en su mayoría *arqueas halófilas* o también llamadas *haloarqueas*. Uno de los pioneros en el estudio de los ambientes hipersalinos fue Benjamin Elazari Volcani, quien después de explorar el Mar Muerto observó en su laboratorio a sus microscópicos habitantes rojizos (Oren & Ventosa, 1999), las **enigmáticas arqueas halófilas**.



Figura 1. Lagos salinos en México. Arriba Real de Salinas, Celestún, Yucatán, y abajo Lago de Alchichica con presencia de estromatolitos, en la cuenca Llano de San Juan, Puebla (Fotografías: Marianela Escalante Avilés y Juan Eduardo Alvarado Islas).

2

¿QUÉ SON LAS ARQUEAS HALÓFILAS?

Las arqueas son microorganismos unicelulares que, bajo el microscopio, pueden confundirse con bacterias por su diminuto tamaño; en el pasado fueron clasificadas, como “*bacterias*”; sin embargo, a finales de la década de 1970, fueron diferenciadas de éstas por primera vez por el grupo de investigación de Carl R. Woese, gracias a sus estudios acerca de las relaciones genéticas y evolutivas entre organismos. Si bien son células procariotas como las bacterias, las arqueas tienen una historia evolutiva independiente y muestran diferencias bioquímicas con otras formas de vida, es por ello que fueron clasificadas en una línea separada y es como hoy en día se reconocen los tres grandes Dominios de la vida *Archaea*, *Bacteria* y *Eukarya* (Woese et al., 1990). Varios científicos tienen la sospecha de que una arquea anciana o un antecesor común más antiguo dio origen a las formas de vida más complejas, conocidos como eucariotas que abarca desde los nemátodos, los hongos, las plantas e incluso los homínidos.

Las *haloarqueas* son halófilos extremos, a esta familia también pertenecen las arqueas metanogénicas (productoras de gas metano) que se desarrollan adecuadamente en ambientes hi-

persalinos carentes de oxígeno (García-Maldonado et al. 2018). Sus miembros crecen bien en condiciones de saturación de sal de cloruro de sodio (NaCl). Son capaces de sobrevivir en altas concentraciones de sal que van desde los 120 hasta 340 g/L, es decir, diez veces más salado que el agua de mar, y la célula pierde su integridad cuando el contenido de sal disminuye por debajo de los 100 g/L. Para prevenir la pérdida de agua, los halófilos acumulan dentro de la célula sólidos como, la glicina betaina, la ectoína y la trealosa, llamados *osmoprotectores*, que son moléculas orgánicas pequeñas que permiten mantener el balance del citoplasma de la célula y la alta presión osmótica ocasionada por el medio altamente salino que la circunda (Ding et al., 2022); y, además, acumulan iones de potasio y cloro para mantener su balance osmótico con el ambiente salino (López-Ortega et al., 2021).

El interés en estos ancestrales microorganismos, así como en los compuestos que producen como colorantes, plásticos “*naturales*” y azúcares complejos es debido a sus propiedades únicas que además tienen potencial aplicación en la biotecnología moderna.



3

LA SAL, LAS ARQUEAS Y LOS FLAMENCOS ROSAS

Al nacer y durante su juventud, el plumaje de los flamencos es blanco o marrón. Sin embargo, el característico color rosado que lucen de adultos es resultado de la ingesta de la microalga halófila *Dunaliella salina* y arqueas halófilas productoras estos pigmentos (Serrano et al., 2022; Yim et al., 2015).

La mayoría de las arqueas halófilas producen pigmentos que las protegen del sol, con colores vibrantes que van desde rojo, anaranjado y rosado (Fig. 2.). Esta pigmentación es debida a producción de bacteriorruberina, y sus derivados, así como de bacteriorodopsina (DasSarma et al., 2020), asociados con el caroteno y el licopeno, ¡sí! el mismo caroteno de las zanahorias anaranjadas y el licopeno de los tomates rojos (Fig. 3).

También en la sal que consumimos es posible encontrar arqueas halófilas. Durante la formación de los cristales de sal, las arqueas están produciendo pigmentos y éstas quedan atrapadas en los cristales, lo que da lugar a la peculiar coloración rojiza en ciertos tipos de sal. Es de destacar que el estudio de estos colorantes es muy atractivo por su potencial en las industrias alimentaria, farmacéutica, cosmética y nutracéutica, para la prevención y tratamiento de enfermedades. Además, se ha encontrado que las AH son capaces de sintetizar cobalamina (vitamina B12), la cual se encuentra principalmente en alimentos de origen animal, como la leche y sus derivados, carne, pescado, pollo y huevos (Durán-Viseras et al., 2019).

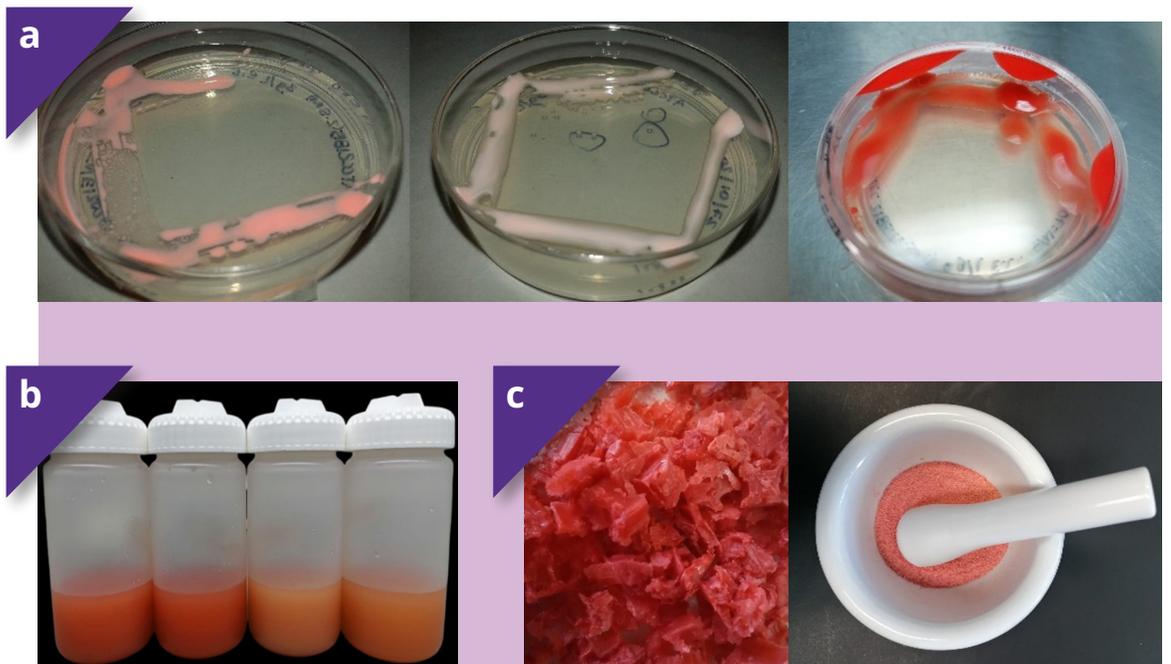


Figura 2.

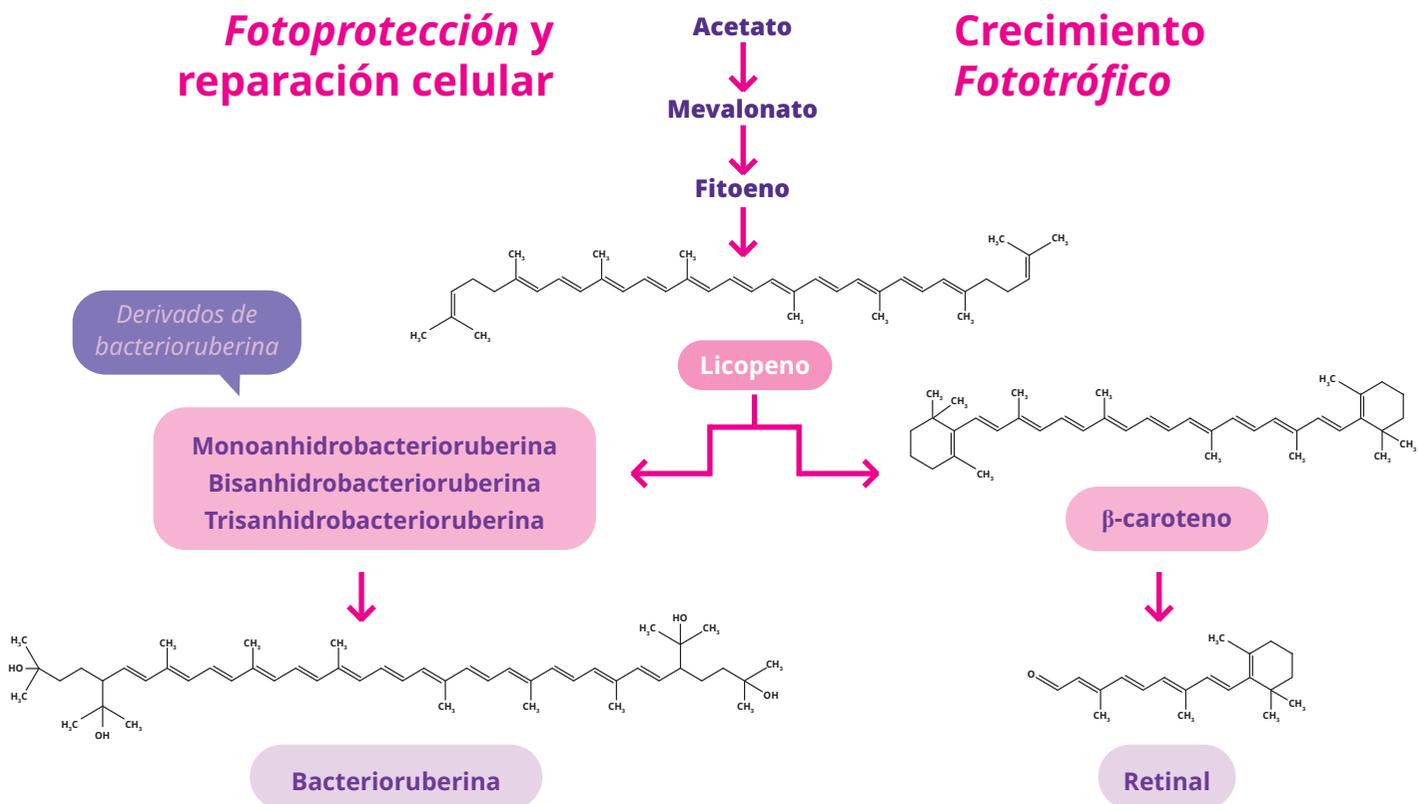
A) Tres cepas de haloarqueas produciendo diferentes tonos de sus pigmentos al crecer en medio sólido.

B) Aspecto del crecimiento de una cepa de arquea halófila en medio líquido con distinto contenido de antiespumante.

C) Células secas (izquierda) y trituradas (derecha) para la recuperación de bioplásticos de arquea halófila con sus característicos pigmentos.

Además, de que estos pigmentos protegen a las arqueas de la radiación solar, también funcionan como antioxidantes, y les permite realizar procesos de fototrofia (producen sus propios nutrientes a partir de la luz solar) y fototaxia (realización de movimientos orientados en respuesta de la luz solar) (DasSarma et al., 2020); digamos que el pigmento funciona como una "antena receptora" que capta la luz y la convierte en una señal que indica al microorganismo un cambio en la movilidad, similar a un girasol.

Figura 3. Ruta de síntesis de pigmentos de interés biotecnológico a partir de haloarqueas.



Otros mecanismos de protección para enfrentar situaciones extremas es la acumulación de plásticos naturales intracelulares del tipo polihidroxi-alcanoatos (PHA) y la producción de cadenas de azúcares, lineales o ramificados, llamados polisacáridos extracelulares (EPS) liberados como una barrera protectora mucoide. Por tanto, las arqueas son consideradas *micro-fábricas* cuyas moléculas tienen potencial aplicación en diferentes áreas de la biotecnología por sus aplicaciones en las industrias cosmética, biomédica, el área de alimentos y empaques alimentarios, farmacéutica y la biorremediación (recuperación de derrames de petróleo y tratamiento de aguas residuales) (Fig. 4).



Figura 4. Aplicaciones de plásticos, polisacáridos y pigmentos producidos por arqueas halófilas en diferentes industrias.

4

POLISACÁRIDOS EXTRACELULARES (EPS)

Las haloarqueas también pueden formar agregados microbianos llamados *biopelículas* (Fig. 5A), éstas permiten a la arquea estar en comunidad, embebidas en una matriz mucoide-viscosa-hidratada, la cual además de servir como retenedor y reservorio de agua (debido a la rápida evaporación y la presencia de alta concentración de sales), también tiene otros propósitos como permitir a la célula adherirse a las superficies, comunicación celular y como barrera de protección contra los rayos solares y la desecación. Estas sustancias extracelulares forman una red pegajosa que inmoviliza e interconecta a las células embebidas en la biopelícula (Fig. 5B). Esta matriz

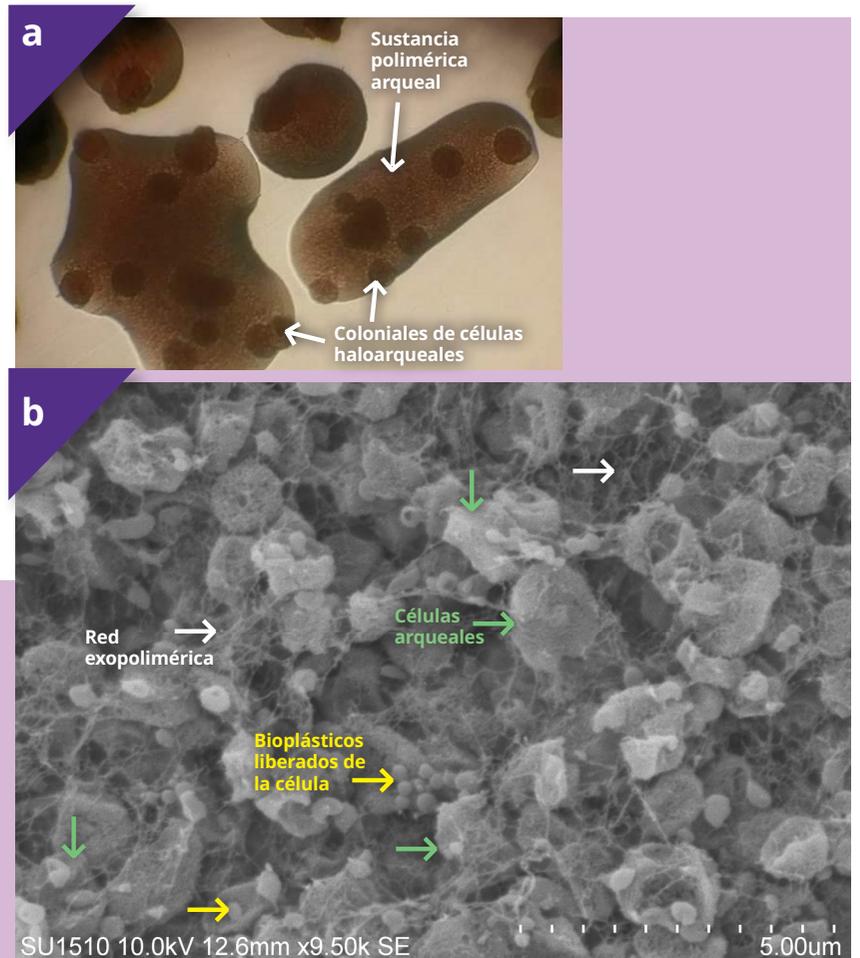


Figura 5.

A) Aspecto de colonias de arqueas halófilas embebidas en matriz biopolimérica crecidas en medio salino.

B) Micrografía tomada por Microscopía Electrónica de Barrido mostrando células arqueales embebidas en una red exopolimérica. Nota: Las flechas amarillas indican la localización de algunas células arqueales, las flechas blancas indican la red exopolimérica (biopelícula) y las flechas verdes indican la presencia de algunos bioplásticos arqueales liberados después de la ruptura de la célula.

está constituida por diferentes polímeros producidos por el propio microorganismo y liberados hacia su medio circundante.

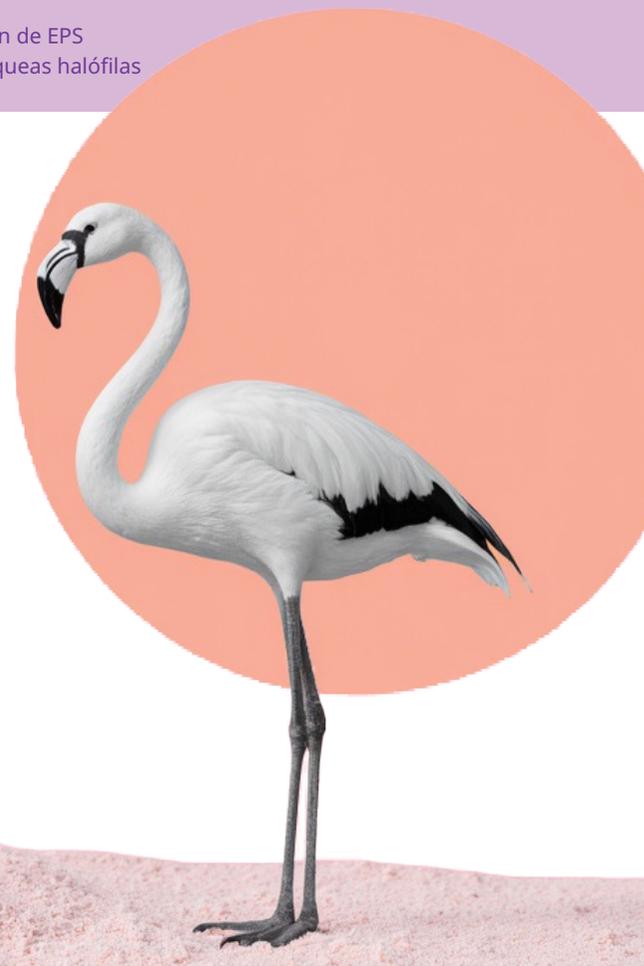
Así como las pequeñas burbujas de unicel se unen para formar una placa, los monómeros (moléculas pequeñas), al unirse a otros monómeros compatibles, ya sean diez, cientos o miles, forman estructuras más complejas llamadas **polímero**. Los **polisacáridos**, son polímeros o cadenas de uno o varios tipos de azúcares, primordialmente están compuestos por átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno; algunos están unidos a la célula (polisacáridos capsulares) mientras que otros son liberados al medio circundante (exopolisacáridos, EPS). Los EPS son los responsables de dar estructura en forma de red a la matriz mucosa.

Si bien, el estudio de polisacáridos no es nuevo, ya que existen múltiples ejemplos de polisacáridos bacterianos, de plantas, algas y hongos, el estudio de polisacáridos haloarqueales sí lo es. Pueden actuar como espesantes y estabilizantes de mezclas agua-aceite manteniendo unidas dos fases que por naturaleza no se pueden mezclar. Por tanto, son buenos candidatos para utilizarse como ingredientes tanto en la industria alimentaria como en el arte culinario, por ejemplo, en la elaboración de jarabes, helados, espumas, emulsiones, jaleas y más.

Además de ser no-tóxicos, son compatibles con células humanas, es decir, hay una respuesta biológica positiva en células normales, "células no enfermas", cuando entran en contacto; al mismo tiempo se ha comprobado que algunos EPS haloarqueales son efectivos para combatir a células tumorales; y se ha demostrado su actividad antioxidante, antimicrobiana y antiviral (Tabla 1).

Arquea halófila	Sal requerida para su crecimiento (g/L)	Aplicación	Referencia
<i>Haloferax mediterranei</i>	150	Viscosificante y espesante	(Antón et al., 1988; Koller et al., 2015; Parolis et al., 1999)
<i>Haloterrigena turmenika</i>	200	Antioxidante y emulsificante	(Squillaci et al., 2016)
<i>Halorubrum</i> sp. TBZ112	200	Anticancerígeno contra células tumorales gástricas	(Hamidi et al., 2019)
<i>Haloarcula hispanica</i>	200	Mecanismo antiviral anti-SARS-CoV-2	(Xu et al., 2022)
<i>Haloarcula</i> sp. M1	233	Capacidad prebiótica y emulsificante	(Aragón-León et al., 2023)
<i>Haloferax mucosum</i>	120 - 250	Viscosificante, espesante y estabilizante de emulsiones	(López-Ortega et al., 2024)

Tabla 1. Potencial aplicación de EPS producidos por algunas arqueas halófilas





PLÁSTICOS ARQUEALES

Los seres humanos tenemos diferentes reservas de energía en nuestro cuerpo, una de ellas es en forma de grasa y cuando no comemos esa energía se va consumiendo poco a poco. Las haloarqueas tienen un mecanismo de reserva similar, acumulando plásticos intracelulares (Fig. 6A), los PHA. La acumulación de los PHA es una respuesta a los diversos factores de estrés ambiental que enfrentan las células (Obruca et al., 2020).

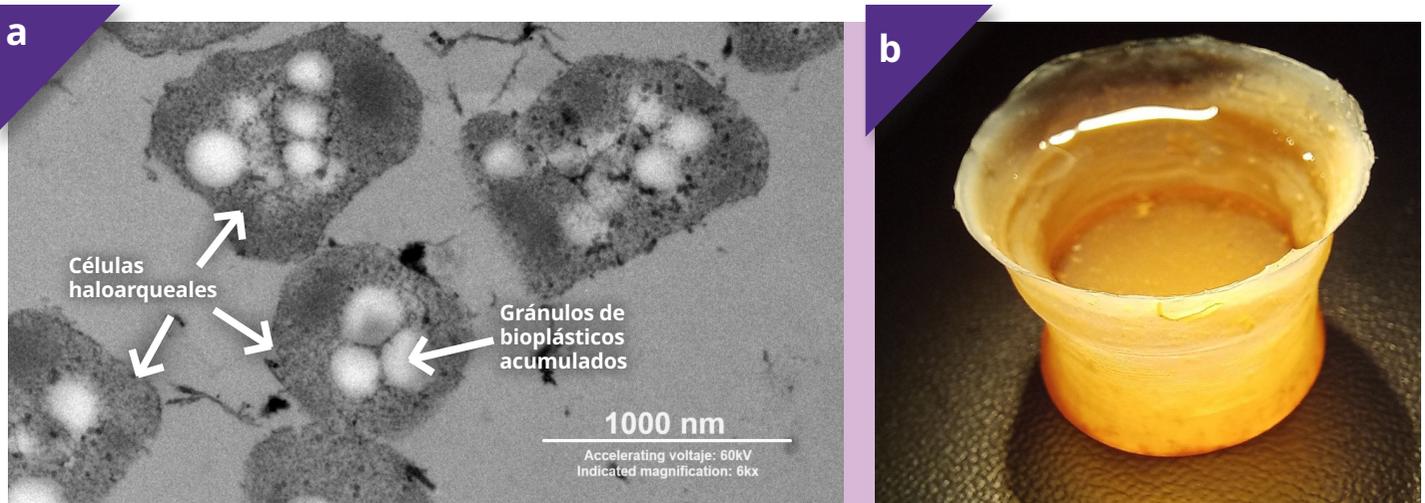


Figura 6.

A) Micrografía del corte transversal de células haloarqueales, crecidas en alto estrés osmótico observadas bajo un microscopio electrónico de transmisión. Los gránulos de color blanco corresponden a PHA acumulado intracelularmente.

B) Recipiente contenedor de agua elaborado a partir de plásticos intracelulares producidos por una arquea halófila.

La contaminación por plásticos sintéticos es un problema crítico con un crecimiento acelerado, se ha estimado que se producen diez billones de toneladas de plásticos y, cerca del 80% de estos son descartados sin reciclar. Los plásticos, que después de su uso se liberan al ambiente, se fragmentan y reducen su tamaño hasta formar plásticos diminutos (desde 10 mil hasta 10 millones de veces más pequeños que un centímetro), ambos invisibles a nuestros ojos. Aunque no podamos verlos, estos plásticos se consideran potencialmente agresivos, debido a su impacto ambiental en suelos y mares por su toxicidad química (Colwell et al., 2023), con alta presencia en el agua potable, plantas comestibles, pescado, carnes, así como en humanos, leche materna y heces de lactantes (Vdovchenko & Resmini, 2024).

Si bien es cierto que hoy en día, es difícil concebir la vida cotidiana sin el uso de plásticos derivados del petróleo, y estos son más bien vistos como nuestros aliados en un sin fin de actividades debido a sus propiedades mecánicas, durabilidad, impermeabilidad al agua, su resistencia, etc. su empleo desmedido y despreocupado causan contaminación. Por otro lado, los PHA pueden ser nuestros aliados, ya que comparten ciertas propiedades



de los plásticos sintéticos, con la ventaja de que son biocompatibles, biodegradables y bioasimilables, haciéndolos atractivos para su empleo en la biotecnología.

La producción de PHA, es menor al 1% comparado con la enorme industria petroquímica, sin embargo, los bioplásticos pueden ser descompuestos en el ambiente natural y finalmente sirven como nutrientes a microorganismos presentes en el subsuelo sin causar problemas a largo plazo. El PHA es un material que puede interactuar con las células sin causar ningún daño, permitiendo su aplicación en medicina regenerativa de tejidos, para encapsular fármacos, en empaques alimentarios para la prolongación de la vida útil de alimentos y la conservación de sus propiedades químico-sensoriales (Romero-Castelán et al., 2023).

A pesar que las arqueas halófilas son excelentes *bio-fábricas* con gran potencial debido a sus “robustos” metabolitos sintetizados, han sido poco estudiadas en comparación con las bacterias. El estudio de las AH y sus fascinantes polímeros sigue llamando la atención por sus posibles aplicaciones en diferentes áreas como la biomédica, cosmética y así como los estudios fascinantes del surgimiento y evolución de la vida en la Tierra.



6

LAS HALOARQUEAS EN EL UNIVERSO

Las haloarqueas han captado la atención de personas investigadoras por sus extraordinarios mecanismos de adaptación, así como su diversidad y rol en la evolución de la vida en nuestro planeta. Se ha encontrado evidencia de la presencia de arqueas halófilas en comunidades microbianas fosilizadas en estromatolitos que son estructuras rocosas minerales construidas por microorganismos (Fig. 1B), cuyo origen data de hace unos 4,000 millones de años en el Eón Arqueano (Medina-Chávez et al., 2019).

De manera sorprendente, algunas haloarqueas han sobrevivido a lanzamientos fuera de la atmósfera de la Tierra y se han adaptado con éxito en condiciones que simulan la superficie en Mar-

te (DasSarma et al., 2020); estos hallazgos han planteado serias especulaciones acerca de encontrar, si existiese, vida extraterrestre en cúmulos de sal como los detectados en las exploraciones del planeta vecino (Bramble & Hand, 2024) y tal vez de otros exoplanetas que se piensa son potencialmente habitables, asentando algunas hipótesis de ciencias emergentes como la astrobiología y la exobiología. Así el estudio del origen mismo de la vida en nuestro planeta y la posibilidad de encontrar marca biológica fuera de él (Souza et al., 2004), quizá pueda responder dos preguntas filosóficas fundamentales: “¿Cómo y cuándo surgió la vida en la Tierra?” y “¿Estamos solos en el universo?”.



7

CONCLUSIONES

El avance en el estudio de arqueas halófilas y sus atractivos compuestos ha sido lento comparado con otros sistemas biológicos. Por lo tanto, es importante que más esfuerzos se dirijan hacia la investigación de éstas, tanto para el conocimiento de la vida primitiva, el mejoramiento de la eficiencia de los procesos de producción de sus compuestos a gran escala, así como para su futura aplicación. Indudablemente, para lograr con éxito lo anterior es indispensable la integración de varios campos del conocimiento como la microbiología y diversas ramas de la ingeniería como las de bioprocesos, genética y alimentaria.

8

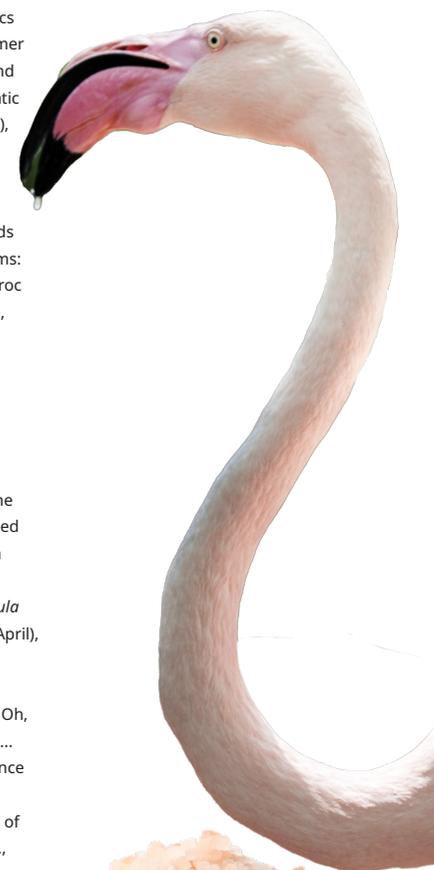
AGRADECIMIENTOS

López-Ortega y Escalante-Avilés agradecen por las becas Posdoctoral [CVU 412346] y Doctoral [CVU 1149260], respectivamente, otorgadas por CONAHcyT-México. Esta investigación fue financiada por los proyectos CONAHcyT números CB-2014, no. 239553; INFRA 2014, no. 238359; INFRA 2015, no. 254437; INFRA 2016, no. 269805, y AFC 2021, no. 316558.



REFERENCIAS

- Antón, J., Meseguer, I., & Rodríguez-Valera, F. (1988). Production of an extracellular polysaccharide by *Haloferax mediterranei*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 54(10), 2381–2386.
- Aragón-León, A., Moreno-Vilet, L., González-Ávila, M., Mondragón-Cortez, P. M., Sasaki, G. L., Martínez-Pérez, R. B., & Camacho-Ruiz, R. M. (2023). Inulin from halophilic archaeon *Haloarcula*: Production, chemical characterization, biological, and technological properties. *Carbohydr Polym.*, 321, 1-11.
- Bramble, M. S., & Hand, K. P. (2024). Spectral evidence for irradiated halite on Mars. *Sci. Rep.*, 14(1), 1-13.
- Colwell, J., Pratt, S., Lant, P., & Laycock, B. (2023). Hazardous state lifetimes of biodegradable plastics in natural environments. *Sci. Total Environ.*, 894, 1-13.
- DasSarma, S., DasSarma, P., Laye, V. J., & Schwieterman, E. W. (2020). Extremophilic models for astrobiology: haloarchaeal survival strategies and pigments for remote sensing. *Extremophiles*, 24(1), 31–41.
- Ding, R., Yang, N., & Liu, J. (2022). The Osmoprotectant Switch of Potassium to Compatible Solutes in an Extremely Halophilic Archaea *Halorubrum kocurii* 2020YC7. *Genes*, 13(6), 939.
- Durán-Viseras, A., Andrei, A. S., Ghai, R., Sánchez-Porro, C., & Ventosa, A. (2019). New *Halonotius* species provide genomics-based insights into cobalamin synthesis in Haloarchaea. *Front. Microbiol.*, 10, 1-19.
- García-Maldonado, J. Q., Escobar-Zepeda, A., Raggi, L., Bebout, B. M., Sanchez-Flores, A., & López-Cortés, A. (2018). Bacterial and archaeal profiling of hypersaline microbial mats and endoevaporites, under natural conditions and methanogenic microcosm experiments. *Extremophiles*, 22, 903-916.
- Hamidi, M., Mirzaei, R., Delattre, C., Khanaki, K., Pierre, G., Gardarin, C., Petit, E., Karimitabar, F., & Faezi, S. (2019). Characterization of a new exopolysaccharide produced by *Halorubrum* sp. TBZ112 and evaluation of its anti-proliferative effect on gastric cancer cells. *3 Biotech*, 9(1), 1-8.
- Koller, M., Chiellini, E., & Braunnegg, G. (2015). Study on the production and re-use of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) and extracellular polysaccharide by the archaeon *Haloferax mediterranei* strain DSM 1411. *Chem. Biochem. Eng. Q.*, 29(2), 87–98.
- López-Ortega, M. A., Chavarría-Hernández, N., López-Cuellar, M. R., & Rodríguez-Hernández, A. I. (2021). A review of extracellular polysaccharides from extreme niches: An emerging natural source for the biotechnology. From the adverse to diverse! *Int. J. Biol. Macromol.*, 177, 559–577.
- López-Ortega, M. A., Escalante-Avilés, M., Rodríguez-Hernández, A. I., López-Cuellar, M. del R., Aguirre-Loredo, R. Y., Martínez-Juárez, V. M., Pérez-Guevara, F., Hernández-Valdepeña, M. Á., & Chavarría-Hernández, N. (2024). Co-production of polyhydroxyalkanoates (PHAs) and exopolysaccharides (EPSs) by halophilic archaeon *Haloferax mucosum*. *New J Chem.*, 48(48), 20188-20200.
- Medina-Chávez, N. O., Viladomat-Jasso, M., Olmedo-Álvarez, G., Eguiarte, L. E., Souza, V., & De la Torre-Zavala, S. (2019). Diversity of archaea domain in Cuatro Ciénegas basin: Archaeal domes. *BioRxiv*, 766709.
- Obruca, S., Sedlacek, P., Slaninova, E., Fritz, I., Daffert, C., Meixner, K., Sedrlova, Z., & Koller, M. (2020). Novel unexpected functions of PHA granules. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 104(11), 4795–4810.
- Oren, A. (2003). Taxonomy of Halophilic Microorganisms: Archaea, Bacteria, and Eucarya. In: *Halophilic Microorganisms and their Environments. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology*, vol 5. Springer, Dordrecht. 23-68 pp.
- Oren A, Ventosa A. Benjamin Elazari Volcani (1915-1999): sixty-three years of studies of the microbiology of the Dead Sea. *Int Microbiol.* 1999; 2(3):195-8.
- Parolis, H., Parolis, L. A. S., Boán, I. F., Rodríguez-Valera, F., Widmalm, G., Manca, M. C., Jansson, P. E., & Sutherland, I. W. (1996). The structure of the exopolysaccharide produced by the halophilic Archaeon *Haloferax mediterranei* strain R4 (ATCC 33500). *Carbohydr. Res.*, 295(96), 147–156.
- Romero-Castelán, E., Rodríguez-Hernández, A. I., Chavarría-Hernández, N., López-Ortega, M. A., & López-Cuellar, M. del R. (2023). Natural antimicrobial systems protected by complex polyhydroxyalkanoate matrices for food biopackaging applications — A review. *Int. J. Biol. Macromol.*, 233(1231418), 1–20.
- Serrano, S., Mendo, S., & Caetano, T. (2022). Haloarchaea have a high genomic diversity for the biosynthesis of carotenoids of biotechnological interest. *Res. Microbiol.*, 173(3), 103919.
- Souza, V., Escalante, A., Espinoza, L., Valera, A., Cruz, A., Eguiarte, L. E., ... & Elser, Y. J. (2004). Cuatro Ciénegas un laboratorio natural de astrobiología. *Ciencias*, 75, 4-12.
- Squillaci, G., Finamore, R., Diana, P., Restaino, O. F., Schiraldi, C., Arbucci, S., Ionata, E., La Cara, F., & Morana, A. (2016). Production and properties of an exopolysaccharide synthesized by the extreme halophilic archaeon *Haloterrigena turkmenica*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 100(2), 613–623.
- Vdovchenko, A., & Resmini, M. (2024). Mapping microplastics in humans: Analysis of polymer types, and shapes in food and drinking water — A Systematic review. *Int. J. Mol. Sci.*, 25(13), 1-20.
- Woese, C. R., Kandlert, O., & Wheelis, M. L. (1990). Towards a natural system of organisms: Proposal for the domains. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.*, 87(June), 4576–4579.
- Xu, Y., Li, Y., You, X., Pei, C., Wang, Z., Jiao, S., Zhao, X., Lin, X., Lü, Y., Jin, C., Gao, G. F., Li, J., Wang, Q., & Du, Y. (2022). Novel insights into the sulfated glucuronic acid-based anti-SARS-CoV-2 mechanism of exopolysaccharides from halophilic archaeon *Haloarcula hispanica*. *Front. Chem.*, 10(April), 1–9.
- Yim, K. J., Kwon, J., Cha, I. T., Oh, K. S., Song, H. S., Lee, H. W., ... & Roh, S. W. (2015). Occurrence of viable, red-pigmented haloarchaea in the plumage of captive flamingoes. *Sci. Rep.*, 5(1), 1-10.





Microorganismos que extraen litio: una solución sostenible desde la biotecnología

Guadalupe Lizbeth Daniel-Gonzalez¹, Carlos Ahuatzi-Reyes¹, Ovier Cabrera-Paredes², José Luis Torres García¹, Francisco José Fernandez-Perrino³, Diana Verónica Cortés Espinosa^{1*}

¹Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada Carretera Estatal Santa Inés Tecuexcomac- Tepetitla, km 1.5, Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, C.P. 90700, México.

²Universidad Autónoma de Tlaxcala, Facultad de Agrobiología, Av. Ribereña S/N, Centro, Tlaxcala C.P. 90000, Tlaxcala, México.

³Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I), Depto. de Biotecnología, C.P 09340, Iztapalapa, México

Autores de correspondencia: *dcortes@ipn.mx



RESUMEN

El litio es un elemento con múltiples aplicaciones industriales, entre las que destacan su uso en baterías recargables, cerámica y vidrio. En la naturaleza se encuentra en rocas y salmueras y su extracción mediante métodos convencionales implica procesos que generan un impacto considerable en el ambiente. La biominería, en particular la biolixiviación, representa una alternativa sostenible para su recuperación, utilizando microorganismos como bacterias, hongos y levaduras. México cuenta con reservas considerables de litio en varios estados, lo que representa una oportunidad estratégica para su desarrollo industrial y económico. Sin embargo, su explotación enfrenta desafíos tecnológicos y ambientales. El uso de microorganismos halotolerantes en la biolixiviación representa un enfoque innovador y sostenible para mejorar la recuperación de litio con un menor impacto ambiental.

Palabras clave: Litio, Biolixiviación, Biominería, Halotolerantes, México.

ABSTRACT

Lithium, an element with multiple industrial applications, is particularly important in the production of rechargeable batteries, ceramics, and glass. In its natural state, it is found in rocks and brines. Conventional extraction processes have a considerable impact on the environment. Bio-mining, particularly bioleaching, is a sustainable alternative for its recovery, making use of microorganisms such as bacteria, fungi, and yeasts. Mexico boasts considerable lithium reserves, dispersed across multiple states, which present a strategic opportunity for its industrial and economic advancement. However, the sustainable exploitation of this natural resource is confronted with significant technological and environmental challenges. The use of halotolerant microorganisms in bioleaching represents an innovative and sustainable approach to enhancing lithium recovery, thereby reducing environmental impact.

Keywords: Lithium, Bioleaching, Biomining, Halotolerant microorganisms, Mexico.

INTRODUCCIÓN

El litio, conocido como "oro blanco", es un metal alcalino esencial en la fabricación de baterías recargables, desempeñando un papel clave en la transición hacia energías más sostenibles (Fornillo et al. 2024). Su demanda ha aumentado significativamente, impulsada por la expansión de la electromovilidad y la necesidad de almacenamiento de energía renovable (Moazzam et al. 2021) México posee importantes reservas de litio, especialmente en Sonora, lo que representa una oportunidad para su explotación y desarrollo industrial (Quemada et al. 2024). Sin embargo, la extracción convencional de li-

tio presenta desafíos ambientales, como el alto consumo de agua y la generación de residuos tóxicos (Ströbele-Gregor 2012). En este contexto, la biominería, y en particular la biolixiviación, emerge como una alternativa sostenible. Este enfoque utiliza microorganismos para movilizar el litio presente en los minerales, reduciendo así los impactos ambientales asociados con las técnicas tradicionales. México enfrenta el desafío de desarrollar tecnologías innovadoras y sostenibles para la extracción de este recurso estratégico (Chen et al. 2022)

¿QUÉ ES EL LITIO?

El litio es un elemento que genera numerosas dudas respecto a su impacto. En la naturaleza, solo se encuentra en combinación con diversas rocas o disuelto en agua (Azamar y Téllez 2022). En la naturaleza se encuentra en forma de mineral (espodumena) y se extrae principalmente de pegmatitas de litio-cesio-tantalio (Fig. 1). La teoría clásica sugiere que las pegmatitas surgen de la cristalización extrema de granito o de la fusión parcial de rocas metamórficas (Koopmans et al. 2024).

Esta particularidad le otorgó su nombre, derivado del término griego "*Lithos*", el cual significa "piedra". De acuerdo con la historia de su descubrimiento se sabe que fue descubierto por primera vez en el mineral de Petalita en 1817, por el químico de origen sueco Johan August Arfwedson.



Figura 1. Espodumena de pegmatita.

3

PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DEL LITIO

El litio es un elemento químico de gran importancia debido a sus múltiples aplicaciones en la industria y la tecnología. Pertenece al grupo de los denominados “metales alcalinos”, y en la tabla periódica es representado con el símbolo químico “Li” y el número atómico “3”. Entre sus propiedades fisicoquímicas más importantes, se encuentran que es menos denso que el agua, es un metal blando y maleable con un punto de fusión de 180.54 °C. Además, posee alta conductividad eléctrica y térmica. Es altamente reactivo y su bajo potencial electroquímico lo hace ideal para baterías recargables, como se puede observar en la Tabla 1 (Brown et al. 2016; Goodenough y Park 2013).

Característica	Valor
Símbolo	Li
Número atómico	3
Masa atómica	6.94 u
Densidad	0.534 g/cm ³
Punto de fusión	180.54 °C
Punto de ebullición	1342 °C
Conductividad eléctrica	1.08 x 10 S/m
Potencial electroquímico	-3.07 V
Estado a temperatura ambiente	Sólido
Color	Plateado/Blanco metálico
textura	Blando y ligero
Grupo	Metales alcalinos (I)
Reactividad	Alta

Tabla 1. Principales características del litio.

4

USOS DEL LITIO

El litio posee una amplia gama de aplicaciones en diversos sectores industriales y tecnológicos, desde la fabricación de vidrios y esmaltes cerámicos hasta la producción de aluminio y la creación de absorbentes de dióxido de carbono para la industria espacial y submarina. Sin embargo, su uso más destacado es en la fabricación de baterías para dispositivos electrónicos portátiles como teléfonos móviles, relojes inteligentes y computadoras portátiles. Además, la creciente demanda de vehículos eléctricos ha impulsado aún más la importancia del litio en los últimos años (Figura 2) (Quintero et al. 2021).

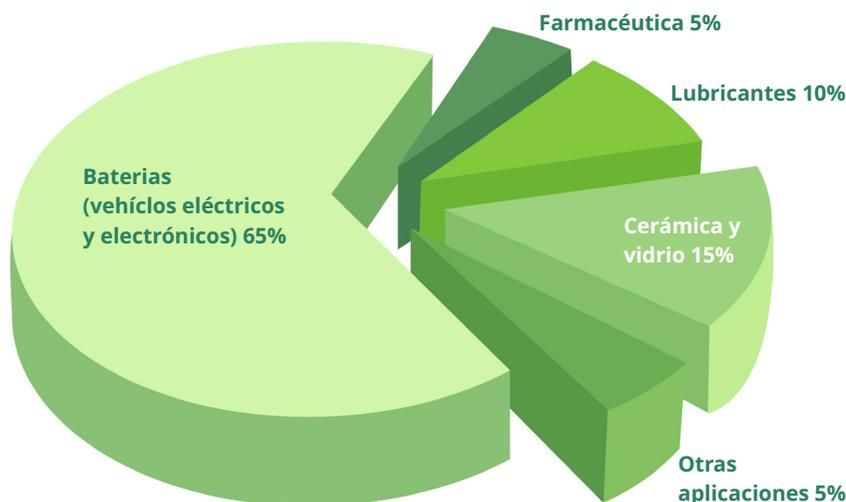


Figura 2. Distribución mundial del litio por sector.

5

PRODUCCIÓN MUNDIAL DE LITIO

Según datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) del año 2016, las reservas anuales de minerales de litio se estimaron en aproximadamente 14 millones de toneladas. Estas reservas se encuentran distribuidas en los cinco continentes: América del Norte, América del Sur, África, Asia y Australia, tal y como se muestra en la Figura 3 (Jaskula 2017).

La producción comercial de litio se concentra principalmente en Chile, Australia y Argentina. Estos tres países son líderes en la extracción de este crucial elemento. En cuanto a las reservas mundiales de litio, Chile y China destacan como los principales poseedores, con un 51.8% y un 22.1% respectivamente. Les siguen Argentina (13.8%), Australia (11.1%), Portugal (0.4%) y Brasil (0.3%) (Jaskula 2017; Swain 2017).

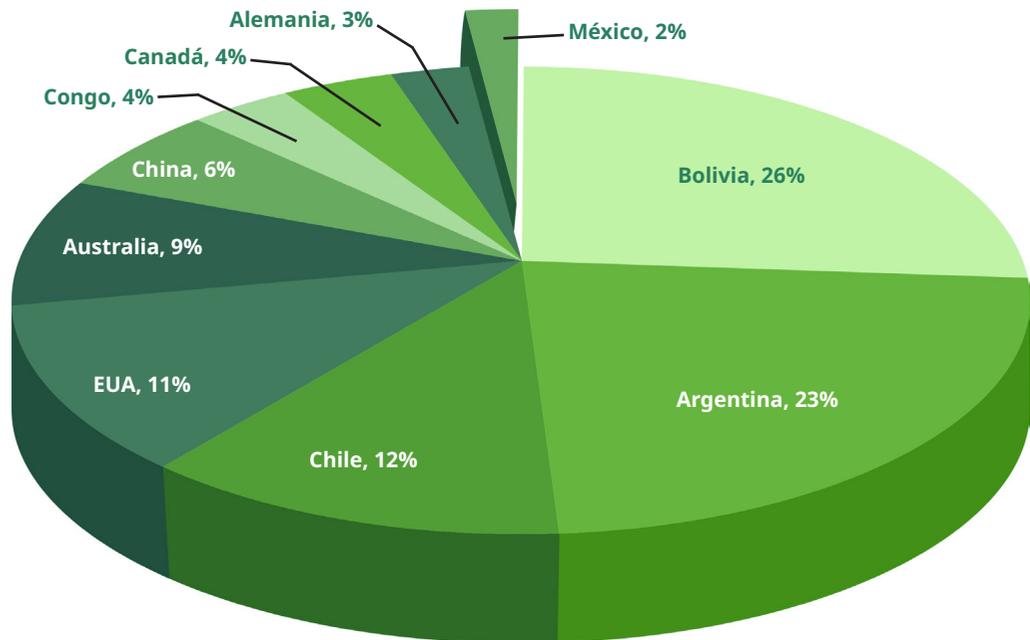


Figura 3. Reservas de litio en el mundo, 2023.

5.1 México ante el litio

México es reconocido por su riqueza en recursos minerales y estratégica posición en el mercado global de litio. Aunque hasta hace poco el litio tenía escasa trascendencia, ahora es clave para el futuro económico y energético del país (Durán 2023). El gobierno muestra un fuerte interés estratégico por explotarlo, buscando impulsar el desarrollo nacional y posicionarse en la cadena de suministro global. Con la demanda mundial en alza y el papel del litio en la transición energética, México deberá adaptar sus políticas de exploración y explotación (Toscana 2023).

5.2 Panorama sobre las reservas de litio en México

México es reconocido por su riqueza en recursos minerales y estratégica posición en el mercado global de litio. Aunque hasta hace poco el litio tenía escasa trascendencia, ahora es clave para el futuro económico y energético del país (Durán 2023). El gobierno muestra un fuerte interés estratégico por explotarlo, buscando impulsar el desarrollo nacional y posicionarse en la cadena de suministro global. Con la demanda mundial en alza y el papel del litio en la transición energética, México deberá adaptar sus políticas de exploración y explotación (Toscana 2023).

Figura 4. Ubicación de principales yacimientos de Litio en México (Modificado de Sánchez y Pérez 2023).



6

EXTRACCIÓN DE LITIO

En la naturaleza, el litio se encuentra principalmente en salmueras, pegmatitas y arcillas (Brown et al. 2016). Debido a las diferencias en su ubicación y composición, se requieren procesos de extracción y procesamiento específicos para cada una de ellas, en donde de manera general el proceso de extracción consiste en: 1.- La extracción del material a partir de diversas fuentes, 2.- Procesamiento para concentrarlo y purificar mediante procesos físicos y químicos y 3.- La precipitación de manera comercializable tal y como se muestra en la Figura 5. Estos procesos presentan desafíos ambientales y tecnológicos, como el alto consumo de energía y recursos naturales, además del lento e ineficiente proceso de extracción (Vera et al. 2023).

6.1 Extracción a partir de salmueras

Las salmueras de litio se localizan en lagos salinos y salares, destacando especialmente el “triángulo del litio” —Argentina, Bolivia y Chile— (Brown et al. 2016). El método de extracción varía según el tipo de depósito, pero generalmente sigue un proceso similar (Swain 2017).

1. Se perforan rocas porosas que contienen salmueras con litio.
2. Se bombean estas aguas hacia estanques de evaporación.
3. La evaporación, impulsada por el sol y el viento, concentra progresivamente los minerales.

6.2 Extracción a partir de pegmatitas

Las pegmatitas son rocas ígneas (formadas por la solidificación del magma) contienen minerales ricos en litio, como la espodumena (Brown et al. 2016). Su extracción incluye una serie de proce-

sos que se implementan, como el bombeo y la evaporización, precipitación y finalmente la purificación del metal de interés (Swain 2017).

6.3 Extracción a partir de arcillas

Existen minerales arcillosos, como la hectorita, que contienen concentraciones significativas de litio. Mediante el uso de ácido sulfúrico se disuelve el litio contenido en la arcilla. Los residuos sólidos son separados usando filtros, y la solución obtenida es sometida a procesos de precipitación química y cristalización.

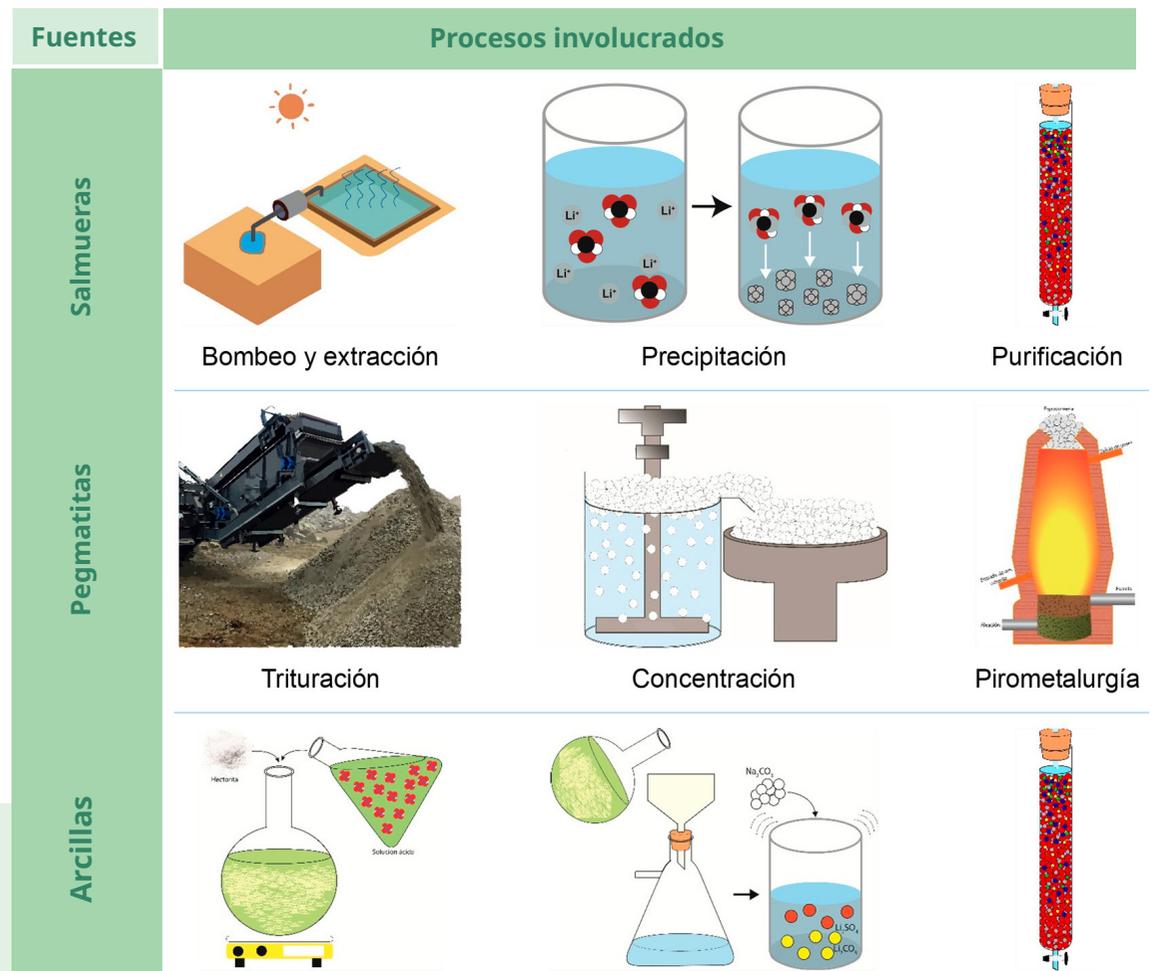


Figura 5. Procesos involucrados en la extracción de litio a partir de diversas fuentes.

6.4 Biominería

La biominería engloba procesos microbiológicos que usan microorganismos (bacterias, arqueas u hongos) para extraer metales de minerales y residuos (Bernardelli et al. 2017). Un proceso clave es la biolixiviación, donde microorganismos extremófilos oxidan y solubilizan minerales complejos para liberar metales. Estos microorganismos, como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, sobreviven en condiciones extremas para extraer metales mediante biohidrometalurgia. Además, la biominería incluye técnicas complementarias como:

- **Biooxidación** de minerales refractarios para mejorar la recuperación de metales (oro, cobre).
- **Biosorción y bioprecipitación** para remediación y purificación, útiles en tratamiento de efluentes y suelos contaminados.

6.4.1 El papel de los hongos, levaduras y bacterias en la biolixiviación para la recuperación del litio.

La biolixiviación, es un proceso para recuperar metales con interés económico y también se puede utilizar para recuperar litio, a partir de baterías gastadas, se basa en la acción de diversos microorganismos (bacterias, hongos y levaduras) que utilizan diferentes estrategias biológicas para liberar los metales valiosos, permitiendo su extracción.

En el campo de la biominería, los hongos juegan un papel crucial debido a su naturaleza heterótrofa y su habilidad para generar ácidos orgánicos y otros metabolitos que facilitan la disolución de metales (Sanny et al. 2022). Especies fúngicas como *Aspergillus niger* y varias especies de *Penicillium* (incluyendo *P. chrysogenum* y *P. simplicissimum*) han sido identificados como particularmente útiles en la biolixiviación de litio (Lobos et al. 2021). Las levaduras, organismos microscópicos que se alimentan de materia orgánica, también juegan un papel en la biohidrometalurgia. Esto se debe a que producen ácidos y sustancias similares a polímeros, conocidas como exopolisacáridos (EPS), que ayudan a disolver metales y a descomponer minerales (Jaiswal y Srivastava 2024). Las bacterias desempeñan un papel multifacético en la biohidrometalurgia, con un enfoque particular en la extracción de litio. Las bacterias acidófilas quimiolitotróficas, como las especies de *Acidithiobacillus*, son cruciales debido a su capacidad para oxidar el hierro y/o el azufre (Jones et al. 2023).



6.4 .2 Mecanismos de biolixiviación por microorganismos

Diferentes referencias describen en específico dos mecanismos básicos de biolixiviación,

- Mecanismo directo / de contacto
- Mecanismo indirecto / sin contacto

En el proceso de contacto directo los microorganismos se adhieren al mineral y oxidan directamente los elementos a través de una matriz de EPS donde ocurren las reacciones. Este mecanismo existe, pero es raro.

La biolixiviación indirecta es el método más común: los microbios liberan iones férricos o ácido sulfúrico que disuelven minerales sin contacto directo, permitiéndoles extraer los metales deseados. Con respecto a la biosorción, los péptidos en la superficie celular se enlazan con alta afinidad a iones metálicos específicos, eliminándolos desde soluciones acuosas.

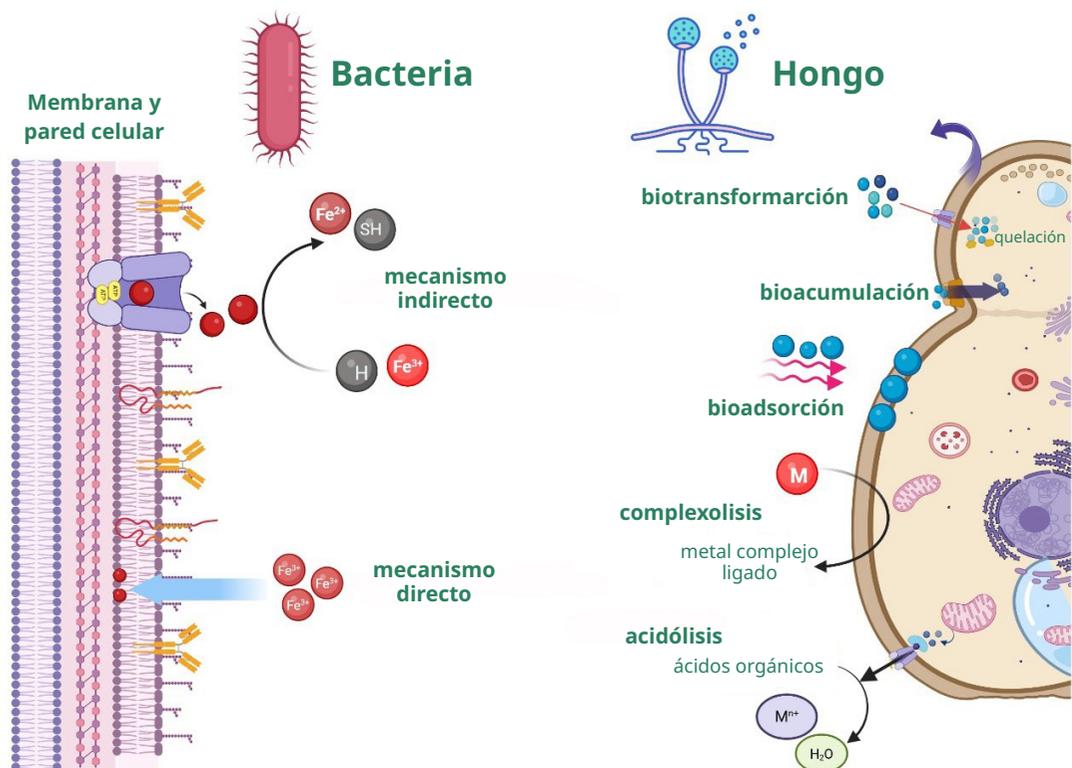
En la bioacumulación los contaminantes se acumulan dentro del organismo. El Índice de Bioacumulación (IBA) cuantifica este proceso

comparando la concentración del metal en el organismo vs en el medio.

Diversos microorganismos, que abarcan tanto bacterias como hongos, exhiben mecanismos específicos para la bioextracción de metales. Estos mecanismos se conocen como redoxólisis, acidólisis y complexólisis y/o quelación (Jaiswal y Srivastava 2024).

- Redoxólisis: los microbios cambian el estado de oxidación del metal (oxidando o reduciendo), lo que facilita su solubilización. Puede actuar directa o indirectamente.
- Acidólisis: bacterias u hongos producen ácidos (orgánicos o inorgánicos) que disuelven metales como plomo, cobre, níquel y zinc.
- Complexólisis / Quelación: metabolitos microbianos (como sideróforos, cianuros o ácidos) forman complejos solubles con metales preciosos (oro, platino, paladio), facilitan su separación y recuperación.

Figura 6. Mecanismo de biolixiviación: A) Mecanismo directo e indirecto en membrana bacteriana, B) Mecanismo metabólico en célula fúngica.



7 RECUPERACIÓN DE LITIO

Los principales métodos para recuperar metales hoy son la pirometalurgia y la hidrometalurgia (Xin et al. 2009). La pirometalurgia utiliza temperaturas muy altas (500–1 000 °C) para fundir minerales o residuos electrónicos, siendo eficaz para metales como cobre, plomo y zinc, pero poco útil para el litio, que pasa a formar escoria por su baja fusión y alta reactividad (Biswal y Balasubramanian 2023). El proceso incluye trituration, tostación o fusión, seguido de refinación posterior. Las principales ventajas y desventajas de este método se mencionan a continuación:

Ventajas:

- Procesa grandes volúmenes rápidamente.
- Relativamente sencillo, sin necesidad de molienda en algunos casos

Desventajas:

- Alto consumo energético y elevados costos.
- Emisión de gases contaminantes (CO₂, SO₂).
- Genera residuos sólidos y pierde el litio en la escoria

La hidrometalurgia implica disolver metales usando soluciones acuosas (ácidas, alcalinas o reductoras), seguido de purificación (adsorción, filtración, extracción por solventes, electrodeposición o precipitación). Entre las ventajas y desventajas de este método destacan:

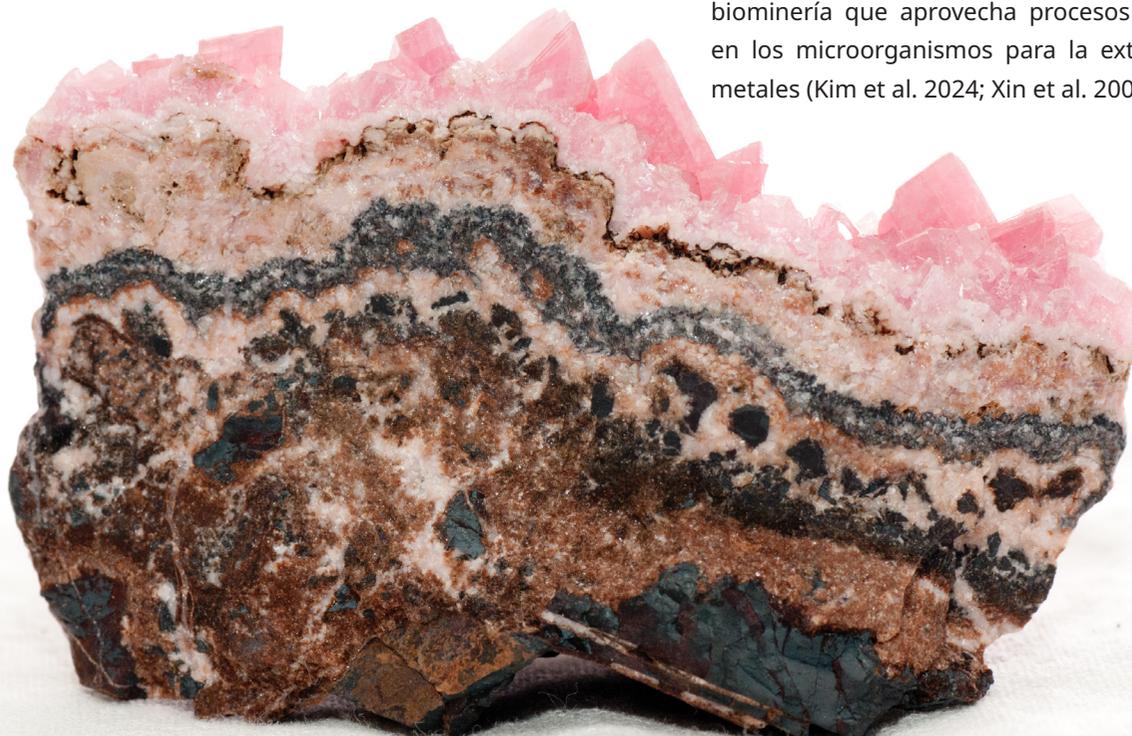
Ventajas:

- Menor consumo energético.
- Alta selectividad y pureza del metal extraído.
- Menores emisiones gaseosas.

Desventajas:

- Genera residuos líquidos contaminantes y requiere tratamiento.
- Reactivos costosos y exige control preciso de condiciones.

Dadas las limitaciones que estos métodos presentan en aspectos como la generación de residuos, el consumo energético y los costos de operación y mantenimiento, se hecho necesario el desarrollo de métodos más limpios, económicos y sostenibles para la obtención de litio; uno de ellos es la biolixiviación, que es una forma de biominería que aprovecha procesos biológicos en los microorganismos para la extracción de metales (Kim et al. 2024; Xin et al. 2009).



8

CONCLUSIONES

El litio es esencial para la fabricación de baterías y aplicaciones industriales, lo que ha incrementado su demanda global. Aunque es relativamente abundante en la corteza terrestre, su extracción presenta desafíos ambientales y tecnológicos. Las técnicas convencionales de obtención de litio a partir de salmueras, pegmatitas y arcillas requieren grandes volúmenes de agua y generan residuos potencialmente contaminantes. En este contexto, la biominería, y en particular la biolixiviación, emerge como una alternativa sostenible para la recuperación de litio, aprovechando la capacidad de ciertos microorganismos para solubilizar metales sin procesos altamente contaminantes.

México posee reservas significativas de litio, principalmente en arcillas, lo que representa una oportunidad para su explotación y desarrollo industrial. Sin embargo, la extracción de litio a partir de estos depósitos sigue siendo un desafío técnico y económico. La implementación de procesos biotecnológicos, como la biolixiviación con microorganismos halotolerantes, podría ofrecer una solución viable y ambientalmente amigable para mejorar la recuperación del metal.

Finalmente, el futuro de la industria del litio dependerá de la optimización de tecnologías sostenibles que permitan su extracción eficiente con el menor impacto ambiental posible, asegurando su disponibilidad para el avance de la transición energética global.

9

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por las becas No. 1238884 y No. 2048270, y a la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) por el apoyo brindado al proyecto 4222c24.



REFERENCIAS

- Azamar A (2022) El litio en México: verdades y mentiras. In Minería en México, panorama social, ambiental y económico. Editado por: A Azamar and I Tellez. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales, Miguel Hidalgo, CDMX. 27—46 pp.
- Bernardelli C, Plaza JC, Urbieta MS, Donati ER (2017) Biominería: los microorganismos en la extracción y remediación de metales. *Industria & Química* 368:47—56.
- Biswal BK, Balasubramanian R (2023) Recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries using microbial agents for bioleaching: a review. *Frontiers in Microbiology* 14:1—22.
- Brown T, Walters A, Idoine N, Gunn G, Shaw R, Rayner D (2016) Lithium profile. *British Geological Survey* [online]. Available from https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/534440/1/lithium_profile.pdf [fecha de revisión 19 marzo 2024].
- Chen, J., Liu, Y., Diep, P., & Mahadevan, R (2022) Harnessing synthetic biology for sustainable biomining with Fe/S-oxidizing microbes. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10.
- Durán D (2023) Por qué es tan importante la explotación del litio en México [online]. Available from <https://www.infobae.com/mexico/2023/03/27/por-que-es-tan-importante-la-explotacion-del-litio-en-mexico/> [fecha de revisión 19 marzo 2024].
- Farías R, Norambuena R, Ferrer A, Camejo P, Zapata C, Chávez R, Orellana O, Levicán G (2021) Redox stress response and UV tolerance in the acidophilic iron-oxidizing bacteria *Leptospirillum ferriphilum* and *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Research in Microbiology* 172(3):1—10.
- Fornillo B, Argento, M, Gatto, E (2024) La ideología en torno a la extracción del litio. *Movilidad, expulsión y fin*. *Quid 16: Revista del Área de Estudios Urbanos* (22):1—20.
- Goodenough JB, Park KS (2013) The Li-ion rechargeable battery: a perspective. *Journal of the American Chemical Society* 135(4):1167—1176.
- Jaiswal M, Srivastava S (2024) A review on sustainable approach of bioleaching of precious metals from electronic wastes. *Journal of hazardous materials advances* 14:1—8.
- Jaskula, BW (2017) Lithium. In *Mineral commodity summaries 2017*. Edited by S Jewell and SM Kimball. U.S. geological survey. Reston, Virg. 100—101 pp.
- Jones S, Santini JM (2023) Mechanisms of bioleaching: iron and sulfur oxidation by acidophilic microorganisms. *Essays biochem* 67(4): 685—699.
- Kim J, Nwe HH, Yoon CS (2024) Enhanced bioleaching of spent Li-ion batteries using *A. ferrooxidans* by application of external magnetic field. *Journal of Environmental Management* 367: 1—7.
- Koopmans L, Martins T, Linnen R, Gardiner NJ, Breasley CM, Palin RM, Groat LA, Silva D, Robb LJ (2024) The formation of lithium-rich pegmatites through multi-stage melting. *Geology* 52: 7—11.
- Lobos A, Harwood VJ, Scott KM, Cunningham JA (2021) Tolerance of three fungal species to lithium and cobalt: Implications for bioleaching of spent rechargeable Li-ion batteries. *Journal of Applied Microbiology* 131(2): 743—755.
- Moazzam P, Boroumand Y, Rabiei P, Baghbaderani SS, Mokarian P, Mohagheghian F, Mohammed LJ, Razmjou A (2021) Lithium bioleaching: an emerging approach for the recovery of Li from spent lithium ion batteries. *Chemosphere* 277:2—17.
- Quemada Villagómez ML, Quemada-Villagómez, LI., Jiménez Islas, H., & Flores Mar NL (2024) Perspectivas estratégicas del Litio en México: Potencial económico y desafíos industriales *Edu.Mx*. Available from <https://citt.itsm.edu.mx/ingenieros/articulos/ingenieros11no2vol1/08%20-60-67.pdf> [fecha de revisión 16 Julio 2025].
- Quintero V, Che O, Ching E, Auciello O, Obaldía E (2021) Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones. *Revista de I+D Tecnológico* 17:1—9.
- Sánchez RA, Pérez R (2023) El litio de México [online]. *Avance y perspectiva* 10(4). Available from <https://avancey perspectiva.cinvestav.mx/el-litio-de-Mexico/> [fecha de revisión 19 marzo 2024].
- Sanny Z, Kucmanova A, Gerulová K (2022) Bioleaching of lithium-ion battery-review. *En seminario internacional de Doctorado 2022* 291 pp.
- Ströbele-Gregor J (2012) Litio en Bolivia: el plan gubernamental de producción e industrialización del litio, escenarios de conflictos sociales y ecológicos, y dimensiones de desigualdad social [online]. *desiguALdades.net Working Paper Series* 14. Available from https://www.bivica.org/files/bolivia_plan-litio.pdf [fecha de revisión 19 marzo 2024].
- Swain B (2017) Recovery and recycling of lithium: a review. *Separation and Purification Technology* 172: 388—403.
- Toscana-Aparicio A (2023) La batalla por el litio de México. *Investigaciones Geográficas* 112:1—2
- Vera, M. L., Torres, W. R., Galli, C. I., Chagnes, A., & Flexer, V. (2023) Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(4), 149—165.
- Xin B, Zhang D, Zhang X, Xia Y, Wu F, Chen S, Li L (2009) Bioleaching mechanism of Co and Li from spent lithium-ion battery by the mixed culture of acidophilic sulfur-oxidizing and iron-oxidizing bacteria. *Bioresource Technology* 100(24): 6163—6169.





Aplicaciones y aprovechamiento biotecnológico de los hongos ascomicetos coprófilos de México

Pedro Miguel Alvarez-Cortés¹, Tania Raymundo¹, Ricardo Valenzuela¹, L. Gerardo Zepeda-Vallejo², Liliana Morales-Barrera³, Michelle Martínez-Pineda^{1,4}

¹Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Departamento de Botánica, Laboratorio de Micología, Prolongación de Carpio y Plan de Ayala, Santo Tomás, Ciudad de México 11340, México; pedromacascomycota@gmail.com (P.M.A.C.); traymundoo@ipn.mx (T.R.); rvalenzg@ipn.mx (R.V.); mmartinezpin@ipn.mx (M.M.P)

²Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Departamento de Química Orgánica, Laboratorio 4, Prolongación de Carpio y Plan de Ayala, Santo Tomás, Ciudad de México 11340, México; lzepeda@ipn.mx (L.G.Z.V.)

³Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Departamento de Ingeniería Bioquímica, Av. Wilfrido Massieu s/n, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Ciudad de México 07738, México; lmoralesb@ipn.mx (I.M.B);

⁴Autor para la correspondencia: mmartinezpin@ipn.mx (M.M.P.)

RESUMEN

Los ascomicetos coprófilos son un grupo de hongos saprótrofos que juegan un rol importante en la descomposición y reciclamiento de los nutrientes contenidos en las deposiciones de los animales. En el metabolismo de estos organismos se producen moléculas tanto en los ascocarpos como en el medio, siendo los más interesantes, los derivados de terpenoides, alcaloides y compuestos fenólicos, que por su potencial aplicación en el ámbito farmacológico, en el tratamiento de enfermedades como infecciones por virus, bacterias y hongos, siendo incluso promisorios en el tratamiento del VIH; así como cosmético, por los pigmentos contenidos en la estructura del hongo, principalmente melaninas, carotenoides y azafilonas. Por ello es necesario estudiarlos por que se pueden obtener los medicamentos del futuro. El objetivo del presente trabajo es dar a conocer los ascomicetos coprófilos y su importancia en la búsqueda de nuevas moléculas para el combate de enfermedades actuales.

Palabras clave: metabolitos especiales, pigmentos, antimicrobianos, cultivo de hongos, excretas.



ABSTRACT

Coprophilic ascomycetes are a group of saprotrophic fungi that play an important role in the decomposition and recycling of nutrients contained in animal feces. In the metabolism of these organisms, molecules are produced both in the ascocarps and in the environment, the most interesting being those derived from terpenoids, alkaloids and phenolic compounds, which due to their potential application in the pharmacological fields, in the treatment of diseases such as infections by viruses, bacteria and fungi, becoming promising even in the treatment of HIV, cosmetic, due to the pigments contained in the structure of the fungus, mainly melanins, carotenoids and azaphylones. It is necessary to study them, with them the drugs of the future can be obtained, so the objective of this work is to raise awareness of coprophilic ascomycetes and their importance in the search for new molecules to combat current diseases.

Keywords: antimicrobials, fungal culture, feces, pigments, special metabolites.

1 INTRODUCCIÓN

Los hongos coprófilos o fimícolas son hongos que están especializados en la degradación de la materia orgánica (saprótrofos), que no se termina de digerir en el tracto gastrointestinal de los animales. Estos organismos han desarrollado estrategias de colonización del sustrato a través de la liberación de enzimas, en el caso de los animales herbívoros, los hongos liberan células que degradan los restos vegetales no digeridos ricos en celulosa para convertirlos en unidades pequeñas de azúcares (Bills et al. 2013).

Estos organismos han cobrado importancia recientemente por la capacidad de producir enzimas que pueden ser aprovechadas en procesos industriales como catalizadores de las reacciones, acelerando los procesos de producción (Ojwach et al., 2020). Por otra parte, sintetizan compuestos químicos que derivan del metabolismo primario y especial, dichos compuestos pueden ser utilizados por distintos sectores industriales (Cimmino et al. 2016). Sin embargo, aún es poco el estudio que se tiene de estos hongos, se requieren de más investigaciones que permitan aprovechar todo lo que estos organismos pueden ofrecer a la humanidad.

2 LA VIDA EN LOS DESECHOS

Los hongos coprófilos han desarrollado ciclos de vida que requieren de los procesos digestivos de los animales para subsistir y colonizar el medio, en este sentido requieren de modificaciones del pH para lograr la activación de las ascosporas, en este proceso, las esporas presentes en la hierba son consumidas por los animales, las esporas pasan por el tracto gastrointestinal del animal, permaneciendo un tiempo en condiciones ácidas por el pH del estómago y posteriormente pasan a condiciones alcalinas en el intestino, esto rompe la pared celular de la espora (perisporio) y estimula el desarrollo del micelio (Richardson y Watling, 1996).



Cuando el animal evacúa, el micelio comienza a desarrollarse y una vez que se den las condiciones de humedad, aireación, temperatura y luz adecuadas, se forman las estructuras de reproducción denominadas ascas. Estos pueden ser de tipo peritecio o pseudotecio (forma de pera), apotecio (forma de copa o disco) o bien cleistotecio (estructuras globosas cerradas) (Ulloa y Hanlin 2006).

Dentro de los hongos coprófilos, los ascomicetos poseen mecanismos únicos de liberación de esporas. Las ascas se llenan de líquido, hinchándose hasta el punto en que las ascosporas son liberadas de forma violenta, facilitándose su dispersión con el viento (anemofilia), así alcanzan grandes distancias, en donde vuelven a caer en la hierba y el ciclo se repite (Richardson, 2019).

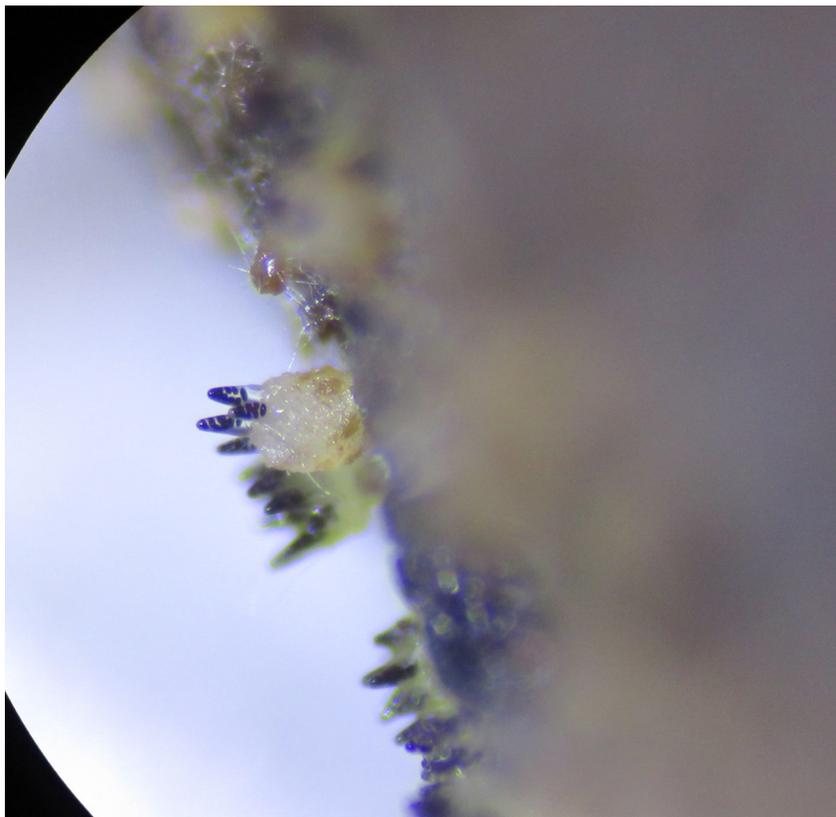


Figura 1. Apotecio de *Ascobolus immersus* Pers.

En el caso de la microbiota mexicana, los estudios fueron realizados por los extranjeros Kimbrough et al. (1971), Bezerra y Kimbrough (1975) y Kobayasi (1979), quienes describieron la biodiversidad de las especies en excretas de vaca, caballo, oveja, cabra y conejo. En 1982, Aguirre-Acosta y Ulloa, describieron la sucesión ecológica de estos organismos en excretas de vaca de la alcaldía Xochimilco en la CDMX. Hoy día se conocen para la microbiota nacional 109 especies de ascomicetos fimícolas, ubicados en 24 géneros: *Delitschia* (7 spp.); *Sporormia* (2 spp.); *Sporormiella* (21 spp.); *Rhytidospora* (1 spp.); *Ascobolus* (2 spp.); *Ascodesmis* (1 spp.); *Chelymenia* (2 spp.); *Coprotus* (6 spp.); *Iodophanus* (3 spp.); *Lasiobolus* (4 spp.); *Pseudombrophila* (1 spp.); *Saccobolus* (3 spp.); *Trichophaeopsis* (1 spp.); *Lophotrichus* (1 spp.); *Kernia* (1 spp.); *Arnium* (2 spp.); *Chaetomium* (3 spp.); *Coniochaeta* (1 spp.); *Podospora* (31 spp.); *Sordaria* (1 spp.); *Hypocopa* (5 spp.); *Podosordaria* (5 spp.); *Poronia* (4 spp.) y *Xylaria* (1 spp.). Sin embargo, aún son pocos los estudios realizados y no reflejan la riqueza total de especies que alberga el territorio nacional y mucho menos la gran variedad de compuestos químicos que pudieran ser de aprovechamiento biotecnológico.

3 METABOLITOS ESPECIALES EN HONGOS



El metabolismo especial, anteriormente llamado secundario, da lugar a compuestos de especial interés por presentar actividad biológica. Los hongos coprófilos pueden producir estas moléculas por dos mecanismos, la vía extra-organismo que se da por ruta fermentativa, mediante enzimas que son liberadas al medio y también intra-organismo en donde el hongo sintetiza pigmentos, mucilagos y demás compuestos a través de rutas metabólicas que suceden en el interior de las células (Alves, 2025). En este sentido se tratarán los principales grupos de moléculas que se han descrito hasta el momento de estos organismos.

4

METABOLITOS PARA EL COMBATE DE MICROORGANISMOS

Los hongos que se desarrollan en las excretas se encuentran sometidos a fenómenos de competencia con otros microorganismos que colonizan este tipo de sustratos, es por ello, que han desarrollado mecanismos para mantener a raya a bacterias, algas, protozoarios y otros hongos (Wang y Kuzyakov, 2024).

El hongo, para obtener los nutrientes, produce enzimas que libera al medio con la finalidad de romper las macromoléculas y así producir monosacáridos, aminoácidos y bases nitrogenadas. Estos nutrientes quedan en el medio y son fácilmente "robados" por las bacterias y otros microorganismos, para evitar esto los hongos producen compuestos que impiden el desarrollo de las bacterias y que se ha observado en investigaciones de laboratorio que son moléculas prometedoras para combatir bacterias patógenas para el ser humano. Esto recientemente cobra importancia por el aumento en la resistencia a los antibióticos, que, según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud del 2024, causan aproximadamente 4.95 millones de muertes anuales. Las bacterias patógenas se han convertido en superbacterias, que resisten el ataque de los antibióticos modernos, lo cual también ocurre con los hongos patógenos y los virus como sucedió en la reciente pandemia de COVID-19 (Soldevila et al. 2023).

En este sentido se han aislado moléculas muy diversas estructuralmente, por mencionar algunas, policétidos, polifenoles, péptidos, terpenoides y esteroides, es interesante destacar que estas moléculas actúan bajo distintos mecanismos. Por ejemplo, la flutimida fue aislada de *Delitschia confertasporea* es un antiviral de tipo piperazina que impide la duplicación de los virus y la pos-

terior infección de las células. Dichas moléculas han mostrado ser prometedora en el tratamiento de enfermedades causadas por virus respiratorios, siguiendo con los compuestos antivirales. Se ha descrito que a partir de *Stilbella aciculosa* se ha obtenido ácido fúxico que ha resultado prometedor en la inhibición del virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) (Bills et al. 2013).

Por otra parte, se han encontrado moléculas con actividad antibacteriana, tal es el caso de las esporovexinas, aisladas de *Sporormiella vexans* (Soman et al. 1999); pseudodestruixinas de *Nigrosabulum globosum* (Che et al. 2001); aranzosinas de *Pseudoarachniotus roseus* (Fehlhaber et al. 1988); bombardolidas de *Bombardioidea anartia* (Hein et al. 2001); anserinonas de *Podospora anserina* (Wang et al. 1997) y comunioles de *Podospora communis* (Che et al. 2005).

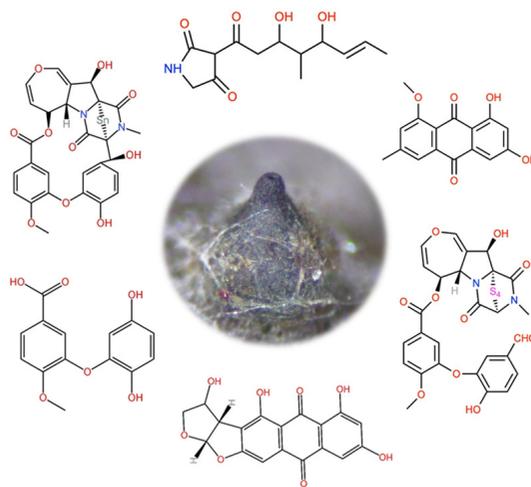


Figura 2. Metabolitos que se han aislado de hongos de la familia Podosporeaceae. Fotografía de *Podospora communis* en estiércol de vaca. 1. Preapiodioneno 2. 1-O-metilemodina 3. Secoemestrina C 4. 13-hidroxi-versicolorina B 5. Ácido violacéico 6. Emestrina (Bills et al. 2013)

El mayor número de moléculas reportadas para hongos han demostrado tener actividad antifúngica, muchos de los mecanismos de acción aún son desconocidos. Se sabe, por ejemplo, que la molécula australifungina aislada del hongo *Sporormiella australis*, inhibe la síntesis de ceramidas, necesarias para la producción de la pared celular del micelio. Otro mecanismo conocido es el del ácido zaragózico B obtenido de *Sporormiella intermedia*, que inhibe la biosíntesis del escualeno, un esteroide importante en la estructura de la pared de las células fúngicas. Diversos géneros de hongos producen compuestos antifúngicos, por mencionar algunos *Ascodesmis*, *Sporormiella*, *Polytolypa*, *Stilbella*, *Petriella*, *Coniochaeta*, *Cercophora*, *Podospora*, *Podosordaria* y *Apiosordaria* (Bills et al. 2013)

5

METABOLITOS EN LA LUCHA CONTRA EL CÁNCER Y TUMORES MALIGNOS

El aumento en los casos de tumores malignos en los últimos años es preocupante, los casos se incrementan gracias a la contaminación por metales pesados, disolventes y humo. En México, según datos del INEGI, durante el año 2022, el 10.6% de las defunciones se debió a casos de cáncer, esto hace que la búsqueda de nuevas moléculas para combatir las células cancerígenas sea una prioridad. En este sentido los hongos coprófilos han demostrado ser productores

de algunos compuestos con actividad frente a líneas células de cáncer de mama, induciendo la muerte por apoptosis. Esta actividad se ha descrito de *Omychophora coprophila*, la molécula responsable es el diterpenoide afidicolina (Fisher et al. 1984). Además de esto, se han descubierto moléculas con actividad citotóxica, es decir, que impiden la reproducción celular, tal es el caso de la tulasneina, aislada de *Posodordaria tulasnei* (Ridderbusch et al. 2004).



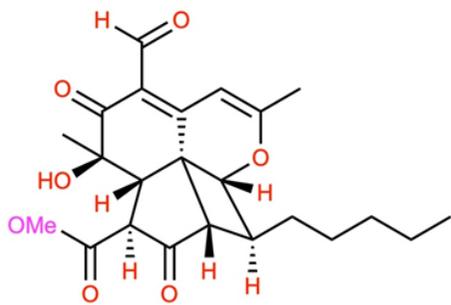
6

METABOLITOS ÚTILES EN LA INDUSTRIA COSMÉTICA

Los ascomicetos producen pigmentos que pueden ser aprovechados por la industria cosmética en la formulación de lápiz labial, sombras, rubores, delineadores, etc. Todos los hongos pertenecientes a las clases Dothideomycetes y Sordariomycetes, producen melaninas que son pigmentos oscuros de color marrón a negro, formados por largas cadenas de polifenoles (El-Naggar y Saber 2022). Estas moléculas se han descrito actividades biológicas que pueden ser aprovechadas por la industria cosmética, pues han demostrado ser protectores frente a la radiación ultravioleta del sol y de elementos radioactivos como el uranio. Además son an-

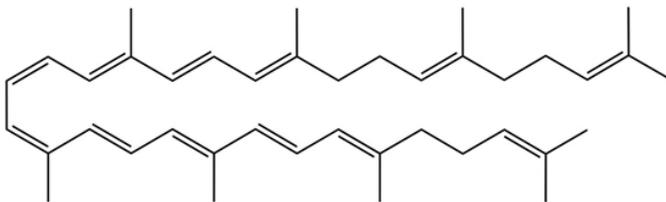
tioxidantes y antibacterianos, que dentro de las formulaciones cosméticas ayudan a prevenir el envejecimiento y son bioabsorbentes, atrapando metales pesados (El-Naggar y Saber 2022).

Aparte de las melaninas se han descrito otros pigmentos como los carotenoides del género *Iodophanus* (Valadón et al. 1980), que generan tonalidades que van del amarillo al anaranjado o las azafilonas producidas por los géneros *Penicillium*, *Aspergillus*, *Chaetomium*, *Monascus* y *Coniella*, entre otros, que generan coloraciones rojizas a violáceas (Yu et al. 2019).



Azafilonas

Pigmentos
Rojo púrpura



Carotenoides

Pigmentos
Anaranjados

Figura 3. Pigmentos aislados de ascomicetos coprófilos del grupo azafilona y carotenoide. (Valadon et al. 1980; Yu et al. 2019)

CULTIVO DE ASCOMICETOS PARA LA OBTENCIÓN DE METABOLITOS

Los ascomicetos fimícolas en su estado natural son escasos con poca biomasa para la extracción de los metabolitos, investigación o aplicación biotecnológica. Por ello se requiere de medios de cultivo que permitan obtener de forma pura al organismo de interés y a partir de ahí obtener los metabolitos. Los medios que han generado los mejores resultados se muestran en la Tabla 1.

El cultivo de estos hongos se vuelve un tanto complicado por los mecanismos de activación de esporas que han desarrollado en la vida silvestre. Sin embargo, el cambio de pH necesario para la germinación y desarrollo del micelio, se puede simular en condiciones de laboratorio mediante el uso de disoluciones de hidróxido de sodio, los mejores resultados se obtienen con un pretratamiento con solución acuosa de hidróxido de sodio 0.1 al 0.3%, cada especie tiene sus propios requerimientos, así las especies de *Ascobolus* y *Coprotus* se desarrollan mejor con pretratamientos con concentración de 0.3% (Dokmetzian et al. 2005). En contraste con *Iodophanus* que requiere solución al 0.1% e incluso algunas especies de este género no requieren pretratamiento alcalino (Cinto y Dokmetzian 2006).



Medio de cultivo

Composición

Referencia

Medio estiércol tindalizado	Estiércol esterilizado colocado sobre papel filtro estéril	Cinto y Dokmetzian 2006; Dokmetzian et al. 2005
Medio glucosa-asparagina	0.5 g de sulfato de magnesio, 0.5 g de fosfato monobásico de potasio, 0.6 g de fosfato monoácido de potasio, 0.4 mg de sulfato cúprico, 0.09 mg de cloruro de manganeso, 0.07 mg de ácido bórico, 0.02 mg de molibdato de sodio, 1 mg de cloruro férrico, 10 mg de cloruro de zinc, 5 µg de biotina, 0.1 mg de clorhidrato de tiamina, 7.5 g de glucosa, 1 g de L-asparagina, 18 g de agar, aforado a un litro con agua destilada	Cinto y Dokmetzian 2006; Dokmetzian et al. 2005
Medio papel de filtro	3 g de extracto de levadura, 18 g de agar, aforado a un litro de agua destilada	Cinto y Dokmetzian 2006; Dokmetzian et al. 2005
Medio agar-agua	18 g de agar en un litro de agua	Cinto y Dokmetzian 2006; Dokmetzian et al. 2005
Medio carboximetilcelulosa (CMC)	2 g de nitrito de sodio, 0.5 g de fosfato monoácido de potasio, 0.2 g de sulfato de magnesio, 0.02 g de cloruro de calcio, 0.02 g de sulfato de manganeso, 0.02 g de sulfato ferroso, 15 g de agar, 5 g de CMC, aforar a un litro con agua destilada	Cinto y Dokmetzian 2006
Medio extracto de malta	12.5 g de extracto de malta, 10 g de glucosa, 20 g de agar, aforar a un litro con agua destilada	Cinto y Dokmetzian 2006

Tabla 1. Composición de los medios de cultivo útiles para el desarrollo de micelio y ascomas de especies coprófilas de ascomicetos.

8

EL FUTURO DE LOS ASCOMICETOS COPRÓFILOS MEXICANOS

El estudio de los hongos coprófilos ha demostrado un gran beneficio a la humanidad para mejorar la salud. Se necesitan investigaciones que involucren la descripción de especies endémicas del país, la caracterización y elucidación estructural de los metabolitos producidos en el sustrato y en los ascomas, la actividad biológica sobre diversas cepas patógenas de hongos filamentosos, levaduras, bacterias, virus, líneas celulares cancerosas, etc. Así como los posteriores estudios de biodisponibilidad, preclínicos y clínicos, brindará futuros medicamentos en el mercado.

Sin embargo, el proceso de la investigación que involucra los ámbitos básico y aplicado, es largo, requiere al menos 10 años de arduo trabajo de laboratorio en colaboración con el sector industrial y clínico. ¡Aún nos falta mucho camino que recorrer!



Figura 4. Apotecio de *Ascobolus michaudii* Boud.

9

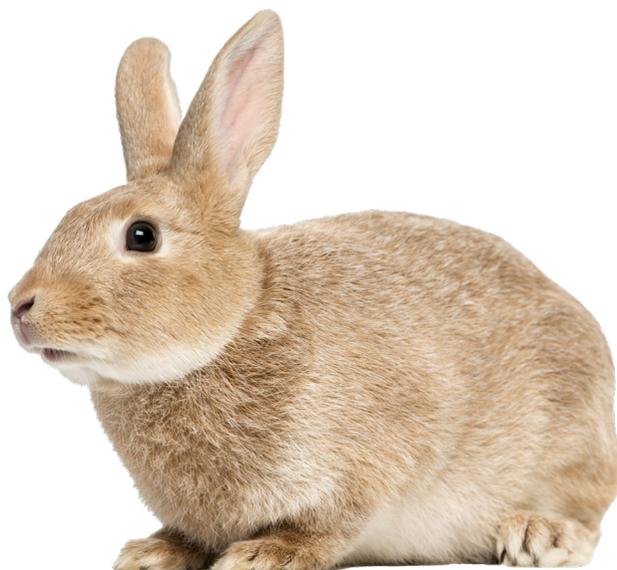
CONCLUSIONES

Los ascomicetos coprófilos son fuente prometedora de moléculas bioactivas para el combate de enfermedades actuales como el cáncer, VIH (SIDA) y la resistencia a los antibióticos. Los compuestos químicos aislados han demostrado tener actividad antiviral, antifúngica, antibacteriana, citotóxica y antitumoral. Las técnicas de cultivo permitirán desarrollar procesos industriales para la producción en masa de los metabolitos, sin embargo, es un campo poco explorado en México y se requiere de investigadores expertos que aporten el conocimiento de los compuestos con potencial utilidad aislados de especies mexicanas.

10

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional (SIP) el apoyo otorgado para la realización de las investigaciones con hongos en los proyectos SIP 20251037, SIP 20251281 y SIP 20251282. Se agradece a la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del I.P.N. las facilidades para realizar las exploraciones de campo. Alvarez-Córtés agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada para realizar sus estudios de Maestría. Raymundo, Morales-Barrera, Valenzuela y Zepeda-Vallejo agradecen al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) el apoyo a sus investigaciones.



REFERENCIAS

- Aguirre-Acosta E, Ulloa M (1982) Primer registro en México sobre la sucesión de hongos en el estiércol de vaca. *Bol Soc Mex Micol* 2:76-88.
- Alves V, Zamith-Miranda D, Frases S, Nosanchuk JD (2025) Fungal Metabolomics: A Comprehensive Approach to Understanding Pathogenesis in Humans and Identifying Potential Therapeutics. *JoF* 11:93.
- Bezerra JL, Kimbrough JW (1975) The genus *Lasiobolus* (Pezizales, Ascomycetes). *Can J Bot* 53:1206-1229.
- Bills GF, Gloer JB, An Z (2013) Coprophilous fungi: antibiotic discovery and functions in an underexplored arena of microbial defensive mutualism. *Curr Opin Microbiol* 16:549-565.
- Che Y, Swenson DC, Gloer JB, Koster B, Malloch D (2001) Pseudodestruixins A and B: new cyclic depsipeptides from the coprophilous fungus *Nigrosabulum globosum*. *J Nat Prod* 64:555-558.
- Che Y, Araujo AR, Gloer JB, Scott JA, Malloch D (2005) Communiols E-H: new polyketide metabolites from the coprophilous fungus *Podospira communis*. *J Nat Prod* 68:435-438
- Cimmino A, Sarrocco S, Masi M, Diqattro S, Evidente M, Vannacci G, Evidente A (2016) Fusaproliferin, terpestacin and their derivatives display variable allelopathic activity against some ascomycetous fungi. *Chem Biodivers* 13:1593-1600.
- Cinto I, Dokmetzian D (2006) *Iodophanus granulipolaris* (Ascomycota-Pezizales): primera cita para la Argentina. Un estudio morfológico y fisiológico. *Hickenia* 3 62:277-284.
- Dokmetzian D, Ramos A, Cinto I, Suárez ME, Ranalli M (2005) Seis especies del género *Coprotus* (Pyronemataceae) de Argentina estudiadas en cultivo. *Hickenia* 3 57:243-252.
- El-Naggar NEA, Saber WI (2022) Natural melanin: current trends, and future approaches, with especial reference to microbial source. *Polymers* 14:1339-1360.
- Fehlhaber HW, Kogler H, Mukhopadhyay T, Vijayakumar EKS, Ganguli BN (1988) Structure of aranorosin, a new antibiotic of a novel skeletal type. *J Am Chem Soc*, 110:8242-8244.
- Fisher PJ, Anson AE, Webster J, Noble HM, Evans JR (1984) *Onychophora coprophila* a new fungus producing aphidicolin. *Trans Br Mycol Soc* 83:149-154.
- Hein SM, Gloer JB, Koster B, Malloch D (2001) Bombardolides: new antifungal and antibacterial γ -lactones from the coprophilous fungus *Bombardioidea anartia*. *J Antibiot* 64:809-812.
- INEGI (2024) Estadísticas a propósito del día mundial contra el cáncer. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2024/EAP_CANCER24.pdf
- Kimbrough WJ, Luck-Allen ER, Cain RF (1971) North America species of *Coprotus* (Thelebolaceae: Pezizales). *Can J Bot* 50:957-971.
- Kobayasi Y (1979) Mycological survey of Mexican volcano Popocatepetl (2). *J Jpn Bot* 54:86-94.
- Ojwach J, Kumar A, Mutanda T, Mukaratirwa S (2020) Fructosyltransferase and inulinase production by indigenous coprophilous fungi for the biocatalytic conversion of sucrose and inulin into oligosaccharides. *Biocatal Agr Biotech* 30:1-9.
- OMS (2024) Los líderes mundiales se comprometen a tomar medidas decisivas contra la resistencia a los antimicrobianos. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/26-09-2024-world-leaders-commit-to-decisive-action-on-antimicrobial-resistance>
- Richardson M (2019) Coprophilous ascomycetes. *Ascomycete.Org* 11: 205-209.
- Richardson M, Watling R (1996) Key to Fungi on dung. *British Mycological Society*. 68 pp.
- Ridderbusch DC, Weber RWS, Anke T, Sterner O (2004) Tulasnein and podospirone from the coprophilous xylariaceous fungus *Podosordaria tulasnei*. *J Biosci*, 59:379-383.
- Soldevila L, Valerio LL, Roure S, Vallés X, Martínez-Arias A, López-Muñoz I, Pérez-Quílez O (2023) La invasión silenciosa de las superbacterias: una amenaza global. *Enf Emerg* 2:20-29.
- Soman AG, Gloer JB, Koster B, Malloch D (1999) Sporovexins A-C and a new preussomerin analog: antibacterial and antifungal metabolites from the coprophilous fungus *Sporormiella vexans*. *J Nat Prod* 62:659-661.
- Ulloa M, Hanlin RT (2006) Nuevo diccionario ilustrado de Micología. APS Press. 615 pp.
- Valadon LRG, Mummery RS, Van Eijk GW, Roeymans HJ, Britton G (1980) Taxonomic implications of the carotenoids of *Iodophanus carneus*. *Trans Brit Mycol Soc* 74:187-190.
- Wang H, Gloer KB, Gloer JB, Scott JA, Malloch D (1997) Anserinones A and B: new antifungal and antibacterial benzoquinones from the coprophilous fungus *Podospira anserina*. *J Nat Prod* 60:629-631.
- Wang C, Kuzyakov Y (2024) Soil organic matter priming: The pH effects. *Glob Chang Biol* 30(6):e17349.
- Yu H, Sperlich J, Höfert SP, Janiak C, Teusch N, Stuhldreier F, Wesselborg S, Wang C, Kassack MU, Dai H, Liu Z, Proksch P (2019) Azaphilone pigments and macrodiolides from the coprophilous fungus *Coniella fragariae*. *Fitoterapia* 137:1042-1049.



Los hongos y su microuniverso molecular



Michelle Martínez-Pineda¹, Pedro Miguel Alvarez-Cortés¹, Tania Raymundo¹, Mabel M. Montenegro-Sustaita², Umanel Azazael Hernández-González³, Ricardo Valenzuela^{1,4}

¹Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Departamento de Botánica, Laboratorio de Micología, Prolongación de Carpio y Plan de Ayala, Santo Tomás, Ciudad de México 11340, México; pedromacascomycota@gmail.com (P.M.A.C.); traymundoo@ipn.mx (T.R.); rvalenzg@ipn.mx (R.V.); mmartinezpin@ipn.mx (M.M.P)

²Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Departamento de Química Orgánica, Laboratorio 4, Prolongación de Carpio y Plan de Ayala, Santo Tomás, Ciudad de México 11340, México; mmontenegro@ipn.mx (M.M.M.S.)

³Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas, Departamento de Formación Profesional Genérica, Calle Circuito del Gato 202, Ciudad Administrativa, Zacatecas 98160, México; uahernandez@ipn.mx (U.A.H.G.)

⁴Autor para la correspondencia: rvalenzg@ipn.mx



RESUMEN

El papel fundamental de los hongos en los ecosistemas es la degradación de la materia orgánica, con el fin de reintegrar los nutrientes al medio ambiente, sin embargo, en el proceso de degradación el micelio produce un sinnúmero de moléculas de estructuras químicas diversas que pueden ser aprovechadas por el ser humano en todo tipo de procesos e industrias, desde el sector alimentario por los aminoácidos, polisacáridos, proteínas y vitaminas que contienen, hasta la industria farmacéutica en donde son aprovechados los metabolitos secundarios en el tratamiento de enfermedades que constituyen una emergencia actual, tal es el caso de varios trastornos mentales o del cáncer, buscando alternativas con bajos o nulos efectos adversos. Sin embargo, los hongos han causado intoxicaciones, en ocasiones mortales, en la población debido a la ingestión de especies silvestres no aptas para el consumo humano. Por lo tanto, en este trabajo pretendemos abordar los aspectos beneficiosos de los hongos para la humanidad, además de mostrar cómo los metabolitos tóxicos presentes en estos organismos también pueden utilizarse en beneficio de los seres humanos.

Palabras clave: farmacología, fungi, medicinal, neurociencia, toxicología

ABSTRACT

The fundamental role of fungi in ecosystems is the degradation of organic matter, in order to reintegrate nutrients into the environment, however, in the degradation process the mycelium produces an endless numbers of molecules with diverse chemical structures that can be used by humans in all kinds of processes and industries, from the food sector due to the aminoacids, polysaccharides, proteins and vitamins they contain, to the pharmaceutical industry, where secondary metabolites are used in the treatment of diseases that constitute a current emergency, such as various mental disorders or cancer, searching for alternatives with low or no adverse effects. However, fungi have caused poisoning, sometimes fatal, in the population due to the ingestion of wild species that are not suitable for human consumption. Therefore, in this work we aim to address the beneficial aspects of fungi for humanity, in addition to showing how the toxic metabolites found in these organisms can also be used for the benefit of humans.

Keywords: fungi, medicinal, neuroscience, pharmacology, toxicology.

INTRODUCCIÓN

Los hongos constituyen un elemento fundamental en el correcto funcionamiento de los ecosistemas, están encargados de la degradación de los restos vegetales y animales con el fin de reintegrar los nutrientes al suelo, son parte importante del ciclo global del carbono (Molina y Pildain, 2022). El micelio es la parte primaria del hongo, encargado de la nutrición del organismo y de llevar a cabo la mayor parte del proceso de degradación de la materia orgánica, cuando los estímulos del medio lo permiten se producen las estructuras de reproducción sexual, denominados esporomas, adoptando varios tamaños, formas, colores y colonizando todo tipo de sustratos desde hojas, madera, hasta piedras o huesos de animales, en estas estructuras se producen las esporas, que aseguran la perpetuación del organismo (Alexopoulos, 2002).

Durante siglos los hongos han convivido con los seres humanos, aportando un sinfín de productos alimenticios, farmacéuticos, cosméticos, agentes de control biológico de plagas, etc. Dentro de los productos que los hongos han aportado a la humanidad destacan la cerveza, vino y pan, producidos por la fermentación debido a la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, la penicilina producida por los hongos filamentosos del género *Penicillium* sp. o las ciclosporinas del hongo *Beauveria nivea*. Además, el uso de los hongos ha escalado hasta la eliminación de materia orgánica en aguas residuales, mediante la especie *Arthromyces ramosus*, sin embargo, también han sido motivo de miedo entre la población, generando micofobia, esto debido a las intoxicaciones y muertes asociadas a varias especies de los géneros *Amanita*, *Clitocybe*, *Cortinarius*, *Lepiota* o *Paxinus*, por mencionar algunos (Benítez-Macías et al., 2009).



2

MOLÉCULAS MEDICINALES AISLADAS DE BASIDIOMICETOS

Los basidiomicetos son organismos fascinantes, degradadores de la materia orgánica en descomposición del suelo, creciendo entre la hojarasca, sobre madera en descomposición o bien asociados a los árboles mediante ectomicorrizas, en donde el micelio del hongo se asocia con las raíces del árbol, obteniendo un beneficio mutuo con intercambio de nutrientes, este grupo de hongos forman estructuras de reproducción en forma de sombrilla, aunque algunas especies pueden formar estructuras esféricas o estrelladas como en el caso de las estrellas de tierra del género *Astraeus* sp., o bien, estructuras en forma de repisa como en el caso de varios poliporoides e hidnoides.



Figura 1. Basidioma de *Ganoderma* sp. desarrollándose sobre tronco vivo en bosque mesófilo de montaña.

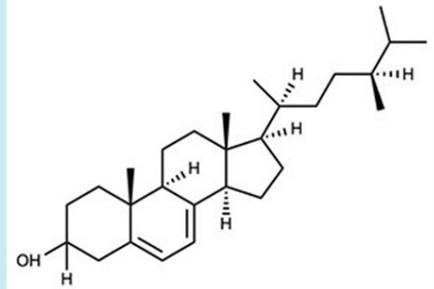


En la actualidad, las investigaciones en el ámbito químico revelan la presencia de moléculas muy interesantes por sus características estructurales y por la actividad biológica que han demostrado en pruebas de laboratorio, tal es el caso de los hongos de repisa de la especie *Ganoderma lucidum*, en donde se han descubierto compuestos inmunoreguladores, inmunosupresores, anticancerígenos y antioxidantes, que pueden ser utilizados en la formulación de medicamentos para combatir enfermedades como hipertensión, úlceras gástricas, diabetes y hepatitis, además de fortalecer el sistema inmune, esto gracias a los terpenoides y polisacáridos producidos por el hongo (Batra et al, 2013).

El género *Lycoperdon* forma estructuras de reproducción o basidiomas de forma esférica, y producen compuestos químicos de naturaleza esteroidal, en particular, *L. pyriforme* la actividad biológica observada fue a nivel de extracto hexánico, y se demostró tener eficacia en la inhibición

de la bacteria *Staphylococcus aureus*, responsable de infecciones en la piel, un descubrimiento importante ante la crisis generada por la resistencia a los antibióticos (Asgharpour et al., 2020). Uno de los compuestos mayoritarios que se obtuvieron del extracto por GC-MS fue el ergosta-5,7-dien-3-ol, para lo cual se requieren más estudios para probar su actividad biológica.

Otro caso es el de los hongos alucinógenos, que además del uso recreativo, religioso y cultural dado en las comunidades indígenas del país, también son muy apreciados en el tratamiento de enfermedades mentales, tal es el caso de la especie *Psilocybe cubensis* que ha demostrado tener efectividad en el tratamiento de depresión, ansiedad, trastorno obsesivo compulsivo (TOC), trastorno de déficit de atención, para disminuir el estrés postraumático y en el tratamiento de adicciones para disminuir los síntomas del síndrome de abstinencia. Estos efectos se dan gracias a la presencia de las moléculas tales como psilocina, psilocibina y sus derivados, la primera posee una estructura química similar a la de la serotonina, la llamada "molécula de la felicidad", que es un neurotransmisor importante involucrado en la regulación del estado de ánimo, sueño, apetito,



Ergosta-5,7-dien-3-ol

Figura 2. A. y B. Basidioma de *Lycoperdon* sp. desarrollándose en el suelo de bosque de Pinus-Quercus con el ergosta-5,7-dien-3-ol como molécula activa.

función sexual y digestión. La ingesta de elevadas cantidades de estos hongos no han demostrado tener efectos secundarios significativos, se ha reportado que se produce un aumento de palpitations del corazón y de la temperatura corporal, además de hipertensión, estos compuestos no producen dependencia por lo que su uso terapéutico es seguro, sin riesgo de generar adicción (Barrientos-Alfaro et al., 2024).

3

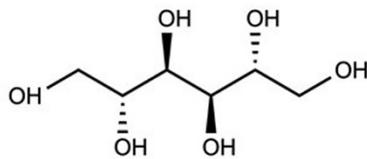
MOLÉCULAS BIOACTIVAS EN ASCOMICETOS

Los ascomicetos son un grupo muy diverso de hongos, está constituido por organismos pequeños que gozan de gran belleza, con forma de copa, disco, pera o esferas, que crecen sobre materia orgánica en descomposición, asociados a briófitas o a las plantas en forma de endófitos, en donde el hongo y planta coexisten intercambiando nutrientes, una vez que la planta muere, el micelio descompone el vegetal y se generan los ascomas, en dichos organismos se han descubierto numerosas moléculas con propiedades medicinales que pueden beneficiar a la humanidad por la actividad biológica que presentan.



Figura 3. Ascoma de *Cookeina* sp. desarrollándose sobre madera en descomposición en bosque tropical perennifolio, con pigmentos carotenoides.

La belleza de los ascomicetos está dada por las formas y colores llamativos que poseen, dichos tonos son producidos por pigmentos que se producen en las células fúngicas que les confieren varias tonalidades (Kalra et al., 2020) así los hongos de colores rojizos como *Hypoxylon* sp. o *Rhytidhysterion* sp., presentan moléculas de tipo quinona (Ming-Jen et al., 2020), en el caso de los hongos anaranjados como en el caso de los géneros *Sarcoscypha* sp., *Cookeina* sp., *Pithya* sp., *Nectria* sp, entre otros, se ha reportado la producción de carotenoides en las paráfisis (Zeng et al., 2023), mientras que los géneros *Marcellina* sp. y *Smardaea* sp., producen pigmentos fenólicos de color morado intenso, dichos pigmentos son considerados antioxidantes, capaces de captar los radicales libres que causan estrés en las células y conducen al desarrollo de enfermedades como cáncer, diabetes o enfermedades neurodegenerativas, estos hongos al contener estos compuestos, pueden ser utilizados como fuente de futuros medicamentos para combatir estas enfermedades.



Manitol



Figura 4. A. y B. Estroma de *Cordyceps* sp. desarrollándose sobre coleóptero enterrado en la hojarasca en bosque de *Pinus-Quercus* con el manitol como molécula activa.

El género *Cordyceps* está constituido por organismos parásitos de insectos, principalmente hormigas, arañas, chapulines, escarabajos en general de artrópodos, se desarrollan principalmente en bosques templados, las estructuras de reproducción son muy apreciadas en la medicina tradicional china por las propiedades medicinales que se le atribuyen, estudios científicos revelan que efectivamente existen efectos farmacológicos asociados a las moléculas de estos hongos, las investigaciones se han centrado en dos especies *Cordyceps militaris* y *C. sinensis*, en donde se han encontrado manitol, esteroides, polisacáridos, aminoácidos y policétidos, que en pruebas de laboratorio demostraron ser antiinflamatorios, antioxidantes, antitumorales, inmunomoduladores, hepatoprotectores y nefroprotectores esto sumado a la baja toxicidad que se ha observado durante los periodos de

exposición del hongo, sin embargo, hace falta un estudio más riguroso para considerar su uso seguro (Jędrejko et al., 2021).

Los hongos de las clases Sordariomycetes y Dothideomycetes producen pigmentos oscuros de naturaleza fenólica que reciben el nombre de melaninas, dichos compuestos han demostrado ser excelentes captadores de la radiación ultravioleta del sol y de la radiación asociada a elementos como el uranio o plutonio. Además, son compuestos antioxidantes (El-Naggar y Saber, 2022), y como base en preparaciones cosméticas, en donde ayudarían a retrasar el envejecimiento por acción del sol y la contaminación ambiental de las grandes ciudades.

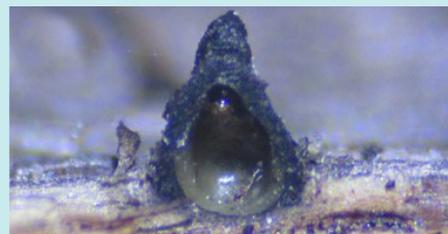
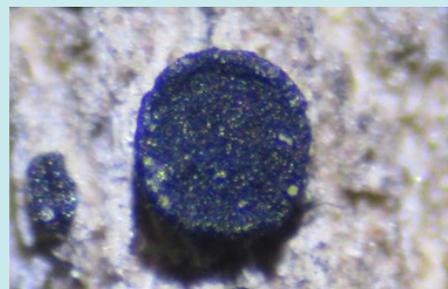
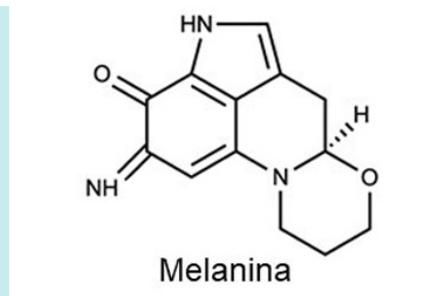


Figura 5. Ascomas de *A. Rosellinia* sp., *B. Rhytidhysteron* sp. *C. Patellaria* sp. y *D. Ophiobolus* sp. desarrollándose sobre madera en descomposición, en vegetación tropical con pigmentos de tipo melanina.

En el género *Daldinia*, además de los pigmentos de tipo quinona y melanina, se han aislado otros compuestos que han demostrado ser eficaces antifúngicos frente a *Cladosporium cucumerinum* un hongo fitopatógeno, la molécula responsable de esta actividad es el helicascólido C, mientras que los Dalesconoles A y B producen inmunosu-

presión, además se identificó un gen que codifica a una enzima capaz de producir el fármaco lovastatina, que se utiliza para bajar los niveles de colesterol en la sangre (Yu et al., 2024), una aplicación biotecnológica muy interesante por el potencial industrial, para poder producirlo de forma más barata, masiva.

4 MOLÉCULAS TÓXICAS DESCRITAS DE HONGOS

En México se han reportado especies tóxicas y mortales, hongos que producen moléculas como la muscarina, ácido iboténico, muscazona, muscimol y ácido stizolóbico, que causan daños a nivel hepático, renal y en el sistema nervioso central, produciendo alucinaciones, convulsiones, alteraciones respiratorias y en dosis altas induce el coma y pueden provocar la muerte (Buriillo-Putze et al., 2013), dentro de las especies que se han reportado para el país, se indican como más comunes en generar intoxicaciones *Amanita muscaria*, *Amanita verna*, *Amanita virosa*, *Lepiota cristata*, *Gymnopilus junonius*, *Clitocybe phyllophila*, *Gyromitra infula*, *Agaricus moelleri* y *Omphalotus mexicanus* (Ramírez-Terrazo et al., 2023) por mencionar algunos, sin embargo, en estas especies se ha descubierto que las moléculas tóxicas contenidas pueden ser utilizadas en preparaciones farmacéuticas en donde el principio activo va

contenido en microgramos o miligramos y con ello pueden ayudar en el tratamiento de diversas enfermedades, tal es el caso de los hongos del género *Omphalotus*, tóxicos y mortales, en donde los principios tóxicos han demostrado tener efecto sobre algunas líneas celulares de cáncer, como el de próstata y cérvix (Eckhardt et al., 2023).

Las investigaciones realizadas en la ENCB del IPN en el área de Micología del departamento de Botánica, aplicando biotecnología y metabolómica de especies de hongos mexicanos, descubiertos en bosques mesófilo de montaña, bosque tropical caducifolio y perennifolio, matorrales xerófilos, playas y manglares, han revelado nuevas especies, lo que abre un sinfín de puertas para la identificación de nuevas moléculas, cuyas estructuras químicas son desconocidas.

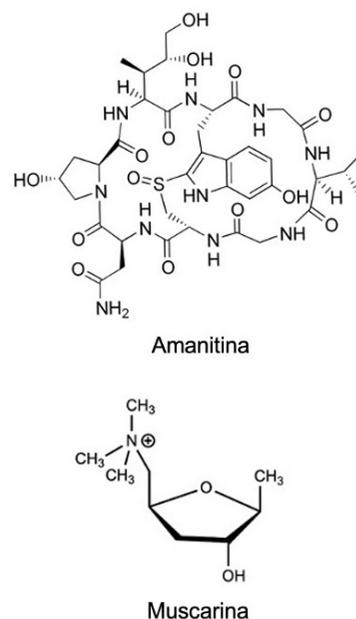


Figura 6. Basidioma de *Amanita muscaria* desarrollándose en el suelo de bosque de *Pinus*, con principios tóxicos amanitina y muscarina.

5

CONCLUSIONES

Los hongos han demostrado ser organismos importantes en la preservación de los ecosistemas, además han beneficiado a la humanidad con sus múltiples aplicaciones, son un recurso importante en la biotecnología alimentaria, ayudando así a mitigar la carencia de la canasta básica en las zonas rurales de México; en cuanto al sector farmacéutico, estos organismos son la futura fuente de principios activos para el desarrollo de nuevos medicamentos, enfrentando la actual crisis de salud pública en el mundo; mientras que los pigmentos y derivados grasos que presentan los convierten en una futura alternativa de obtención de materia prima para elaborar cosméticos de mejor calidad que favorezcan el cuidado y salud de la piel, esto ante el aumento exponen-

cial de la piel a los rayos solares; finalmente en la industria agroalimentaria, son parte importante en control de las plagas que atacan los cultivos, sustituyendo los pesticidas, fungicidas y herbicidas convencionales que son moléculas con elevada toxicidad no aptas para el contacto con el ser humano.

Las investigaciones en México en las áreas química y biotecnológica de hongos aún son pocas y no reflejan todos los compuestos químicos potencialmente útiles para diversas industrias, considerando la amplia biodiversidad de especies de estos organismos en el país, tenemos un universo de moléculas por explorar.



6

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional (SIP) el apoyo otorgado para la realización de las investigaciones con hongos en los proyectos SIP 20251037, SIP 20251281 y SIP 20251282. Se agradece a la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del I.P.N. las facilidades para realizar las exploraciones de campo. Alvarez-Cortés agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca

otorgada para realizar sus estudios de Maestría en Biociencias. Raymundo, Montenegro-Sustaita y Valenzuela agradecen al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) el apoyo a sus investigaciones.



REFERENCIAS

Alexopoulos CJ (2002) Introductory micology, New York, Wiley, 1996. BIAL-ARISTEGUI EI reino de los hongos. Rev Iberoam Micol (1):1-4.

Asgharpour F, Moghadamnia AA, Alizadeh Y, Kazemi S (2020) Chemical Composition and antibacterial activity of hexane extract of *Lycoperdon pyriforme*. S Afr J Bot, 131:195-199.

Barrientos-Alfaro F, Herrera Rojas V, Montero-Quesada M, Picado-Morales J, Sanabria-Brenes M, (2024) *Psilocybe cubensis*: potencial neuropsicofarmacéutico de la psilocibina y psilocina. Tecnol Marcha 37:132-142.

Batra P.; Sharma AK; Khajuria R. (2013). "Probing Lingzhi or Reishi Medicinal Mushroom *Ganoderma lucidum* (Higher Basidiomycetes): A Bitter Mushroom with Amazing Health Benefits". Int J MedMushrooms 15, pp.127-143

Batra P, Sharma AK, Khajuria R (2013) Probing Lingzhi or Reishi Medicinal Mushroom *Ganoderma lucidum* (Higher Basidiomycetes): A Bitter Mushroom with Amazing Health Benefits. Int J MedMushrooms 15:127-143

Benítez-Macías JF, García-Gil D, Brun-Romero F, Nogue-Xarau S (2009) Intoxicaciones agudas por setas. Rev Clin Esp, 209(11): 542-549.

Burillo-Putze G, López-Briz E, Climent Díaz B, Munné-Mas P, Nogue-Xarau S, Pinillos MA, Hoffman RS (2013) Drogas emergentes (III): plantas y hongos alucinógenos. An Sist Sanit Navar, 36(3):505-518.

Eckhardt P, Reinecke S, Opatz T, Stadler M, Sandargo B (2023) Discovery and characterisation of a broderol-like illudin, omphaderol in the mycelial extracts of *Omphalotus mexicanus* (Omphalotaceae) using UPLC-QTOF-MS and NMR spectroscopy. PCA 2023:1-7

El-Naggar NEA, Saber WI (2022) Natural melanin: current trends, and future approaches, with especial reference to microbial source. Polymers 14(7):1339-1360.

Jędrejko K, Lazur J, Muszynska B (2021) *Cordyceps militaris*: An Overview of Its Chemical Constituents in Relation to Biological Activity. Foods 10(11):1-24.

Kalra R, Conlan X A, Goel M (2020) Fungi as a Potential Source of Pigments: Harnessing Filamentous Fungi. Front Chem 8:369-392.

Ming-Jen C, Ming-Der W, Thanda A, Hsiang-Ruei L, Nanthaphong K, Sung H (2020) Metabolites from the Endophytic Fungus *Hyphoxylon monticulosum*. Chem Nat Compd 56:1170-1172.

Molina L, Pildain MB (2022) Uso de la secuenciación de segunda generación (NGS) para descubrir la diversidad de hongos degradadores de la madera en los bosques Andino-Patagónicos. Lilloa 59 (Suplemento): 155-172.

Ramírez-Terrazo A, Garibay-Orijel R, Reyes-Chilpa R, Casas A, Méndez-Espinoza C (2023) Alternativas para la atención oportuna de las intoxicaciones por consumo de hongos en México y Centroamérica. GMM, 159(4):309-321.

Yu M, Chen S, Shi J, Chen W, Qiu Y, Lan J, Qu S, Feng J, Wang R, Lin F (2024) Structures and Biological Activities of Secondary Metabolites from *Daldinia* spp. Jof 10(12):833

Zeng M, Gentekaki E, Hyde KD, Zhao Q, Matočec N, Kušan I (2023) Phylogeny and Morphology of Novel Species and New Collections Related to Sarcoscyphaceae (Pezizales, Ascomycota) from Southwestern China and Thailand. Biology 12(1):130.



**Maestría en
Biotecnología
Aplicada**



**Maestría en
Biotecnología
Productiva**



**Doctorado en
Ciencias en
Biotecnología**



**Doctorado en
Biotecnología
Productiva**



**OFERTA
ACADÉMICA
CONVOCATORIA**

2025



Centro de
Investigación en
Biotecnología
Aplicada
IPN-TLAXCALA



Centro de Investigación en
Biotecnología Aplicada

Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera
Estatad Tecuexcomac - Tepetitla K. 1.5,
Tlaxcala, C.P. 90700, México
www.cibatlaxcala.ipn.mx