

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

Octubre - Diciembre 2025

ISSN:2683-2607

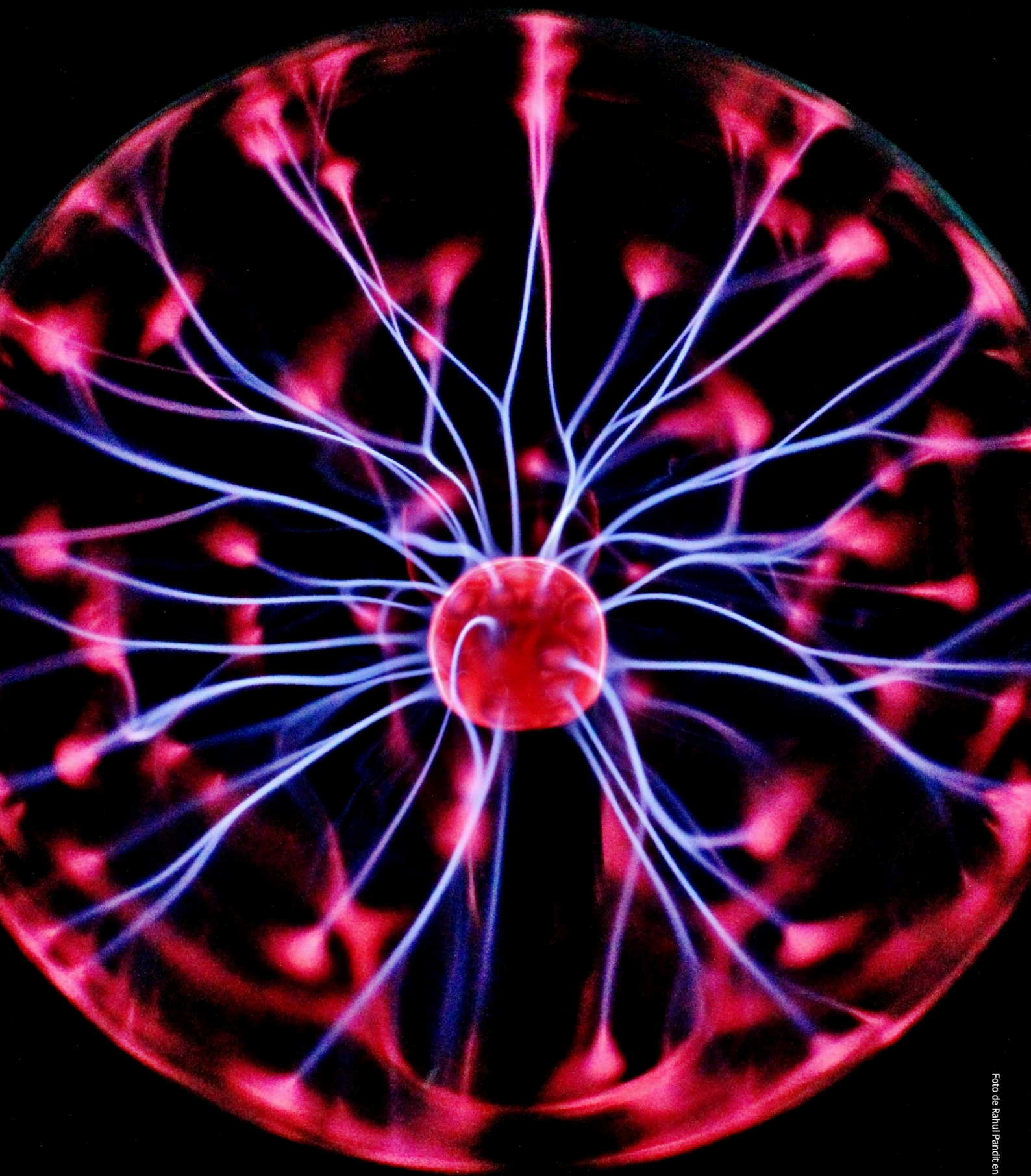
No. 144

DE LO RURAL A LO RURURBANO
EN EL MUNICIPIO DE BENITO
JUÁREZ, TLAXCALA

ACEITE DE INSECTOS: VOLANDO HACIA
UN FUTURO MÁS SOSTENIBLE

OPORTUNIDADES DE MEJORA PARA UN
PROCESO SOSTENIBLE DE SECADO DE
GRANOS DE CACAO

LA NIXTAMALIZACIÓN Y EL MAÍZ



Contenido

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

No. 144 Octubre - Diciembre 2025

		<i>Entre dientes y garras: ¿Cómo coexisten los depredadores en Chihuahua?</i>	52
Editorial	3	Biól. Jorge L. Reyes Díaz Dr. Carlos A. López González Dra. A. Alondra Castro Campillo Dra. Nalleli E. Lara Díaz	
<i>De lo rural a lo rururbano en el Municipio de Benito Juárez, Tlaxcala</i>	5		
Mtra. Laura Ivette García García			
<i>Aceite de insectos: volando hacia un futuro más sostenible</i>	9	<i>Análisis de la narrativa sobre violencia en México a través de técnicas de Inteligencia Artificial</i>	63
M. en C. Juan Jesús Reséndiz Luna		Ing. Leonardo Ortiz López	
Dra. Valeria Caltzontzin Rabell		Dr. Roman Anselmo Mora Gutierrez	
Dra. Claudia Gutiérrez Antonio		Dr. Julián Alberto Fresán Figueroa	
Dr. Fabián Salvador Mederos Nieto		Dr. Sergio de los Cobos Silva	
		Dr. Pedro Lara Velázquez	
<i>Oportunidades de mejora para un proceso sostenible de secado de granos de cacao</i>	14	Dr. Eric Alfredo Rincón García	
Mtro. Carlos Alfredo Sánchez Ramos		Dr. Miguel Ángel Gutiérrez Andrade	
Mtro. David Jesús Jiménez Rodríguez		Dr. Edwin Montes Orozco	
		Mtro. Gilberto Sinuhe Torres Crockell	
<i>La nixtamalización y el maíz</i>	23	<i>Pigmentos vegetales antioxidantes y sus aplicaciones</i>	74
Ing. Misael García Pérez		E. Abilene Lara Mendieta	
Lic. Gustavo Armando Sánchez Rosas		E. Valeria Ocampo Guadarrama	
Dra. Rosa María González Amaro		M. en C. Silvia Marquina Bahena	
Dra. Claudia Y. Figueroa Hernández		Dra. Mariana Sánchez Ramos	
Dr. Oscar González Rios			
Dr. Zorba Josué Hernández Estrada		<i>Huygens y la robótica de enjambres</i>	81
		Dr. Luis Moreno Ahedo	
<i>Materiales compuestos por electrohilado para su uso en ingeniería de tejidos</i>	34	Dr. Raúl Rascón	
Dra. María G. Flores Sánchez		<i>Bromelias: diversidad, adaptaciones e importancia</i>	89
Dr. Roberto Olayo González		Dra. Elizabeth Victoriano Romero	
		Dra. Dulce María Figueroa Castro	
<i>Estrategias educativas para detectar ingeniería social potenciada por Chatbots de inteligencia artificial</i>	46	<i>Tereftalato de polietileno de desecho (PET), su modificación mediante radiación gamma y sus diversos usos</i>	105
Dr. David Filio Aguilar		Mtro. Joel Olaf Camacho Gutiérrez	
Dr. Daniel Guerrero Castillo		Dr. Gonzalo Martínez Barrera	

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

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

Rector General

Dr. José Antonio de los Reyes Heredia

Secretaria General

Dra. Norma Rondero López

UNIDAD IZTAPALAPA

Rectora

Dra. Verónica Medina Bañuelos

Secretario

Dr. Javier Rodríguez Lagunas

Director de la División de Ciencias

Básicas e Ingeniería

Dr. Román Linares Romero

Director de la División de Ciencias

Biológicas y de la Salud

Dr. José Luis Gómez Olivares

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería:

Consejo Editorial:

Dra. Verónica Medina Bañuelos

Dr. Javier Rodríguez Lagunas

Dr. Román Linares Romero

Dr. José Luis Gómez Olivares

UAM- Iztapalapa

Editora en Jefe:

M. C. Alma Edith Martínez Licona

Asistente Editorial:

Ing. Gabriela López Rodríguez

Comité Editorial por CBS:

Dra. Edith Arenas Ríos, Dra. Laura

Josefina Pérez Flores, Dr. Pedro Luis

Valverde Padilla

Por CBI:

Dr. Hugo Ávila Paredes

Por la Universidad Iberoamericana:

Mtro. Adolfo G. Fink Pastrana

CONTACTOS, REVISTA DE EDUCACIÓN EN CIENCIAS E INGENIERÍA.

3ª Época, No. 144, Octubre - Diciembre 2025, es una publicación trimestral de la Universidad Autónoma Metropolitana a través de la Unidad Iztapalapa, División de Ciencias Básicas e Ingeniería y División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Av. Prolongación Canal de Miramontes 3855, Col. Rancho los Colorines, Alcaldía Tlalpan, C.P. 14386, México, Ciudad de México y Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1a Sección, Iztapalapa, Cd. de México. C.P. 09310, Edificio T144, Tel. 5804 – 4600. Ext. 1144. Página electrónica de la revista: <https://contactos.izt.uam.mx/> y dirección electrónica: cts@xanum.uam.mx Editora responsable MC Alma E. Martínez Licona. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo de Título No. 04-2023-061914482700-102, ISSN 2683-2607, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Mtra. Alma E. Martínez Licona; Unidad Iztapalapa, División de CBI y CBS; fecha de última modificación 31 de Diciembre de 2025. Tamaño del archivo 71.4 MB.

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

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

Fecha de Publicación:

Octubre - Diciembre 2025.

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

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

Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería,

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

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

e-mail cts@xanum.uam.mx

Editorial

El conocimiento científico no sólo se construye en laboratorios; también se gesta en los campos, en los talleres y en las comunidades que día a día enfrentan el cambio. En esta edición, exploramos cómo la ciencia mexicana observa, explica y transforma su entorno, desde el corazón rural de Tlaxcala hasta los laboratorios donde se imagina un futuro más sostenible.

El artículo “De lo rural a lo rururbano en el Municipio de Benito Juárez, Tlaxcala”, nos muestra un proceso que viven muchas comunidades del país: la migración, el abandono de la agricultura y la pérdida del paisaje campestre. Sin embargo, también refleja la capacidad de adaptación de las familias, especialmente de las mujeres, que asumen un papel central en las actividades productivas y en la reconstrucción del tejido social. Este tránsito de lo rural hacia lo rururbano nos invita a reflexionar sobre cómo los cambios económicos y culturales están reconfigurando la vida en el campo mexicano.

A la par, otros trabajos reunidos en este número muestran distintas formas en que la ciencia contribuye a un país más sostenible: desde el uso de aceites de insectos para biocombustibles, la optimización del secado del cacao y la preservación del maíz y la nixtamalización, hasta la robótica inspirada en la naturaleza y el reaprovechamiento del PET mediante radiación gamma. Todas estas investigaciones comparten un mismo espíritu: innovar sin perder de vista la realidad ambiental y social del país.

Deseando disfruten, éste, nuestro último número del año, agradecemos su confianza y les deseamos un feliz fin de año.

Atentamente

MC Alma E. Martínez Licona

Editora en Jefe, Revista Contactos



Información para autores

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

Las secciones que la constituyen son:

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

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

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

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

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

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

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

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

Normas

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Envío y características del artículo

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

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

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería.

UAM – Iztapalapa, T144,

Información: cts@xanum.uam.mx,

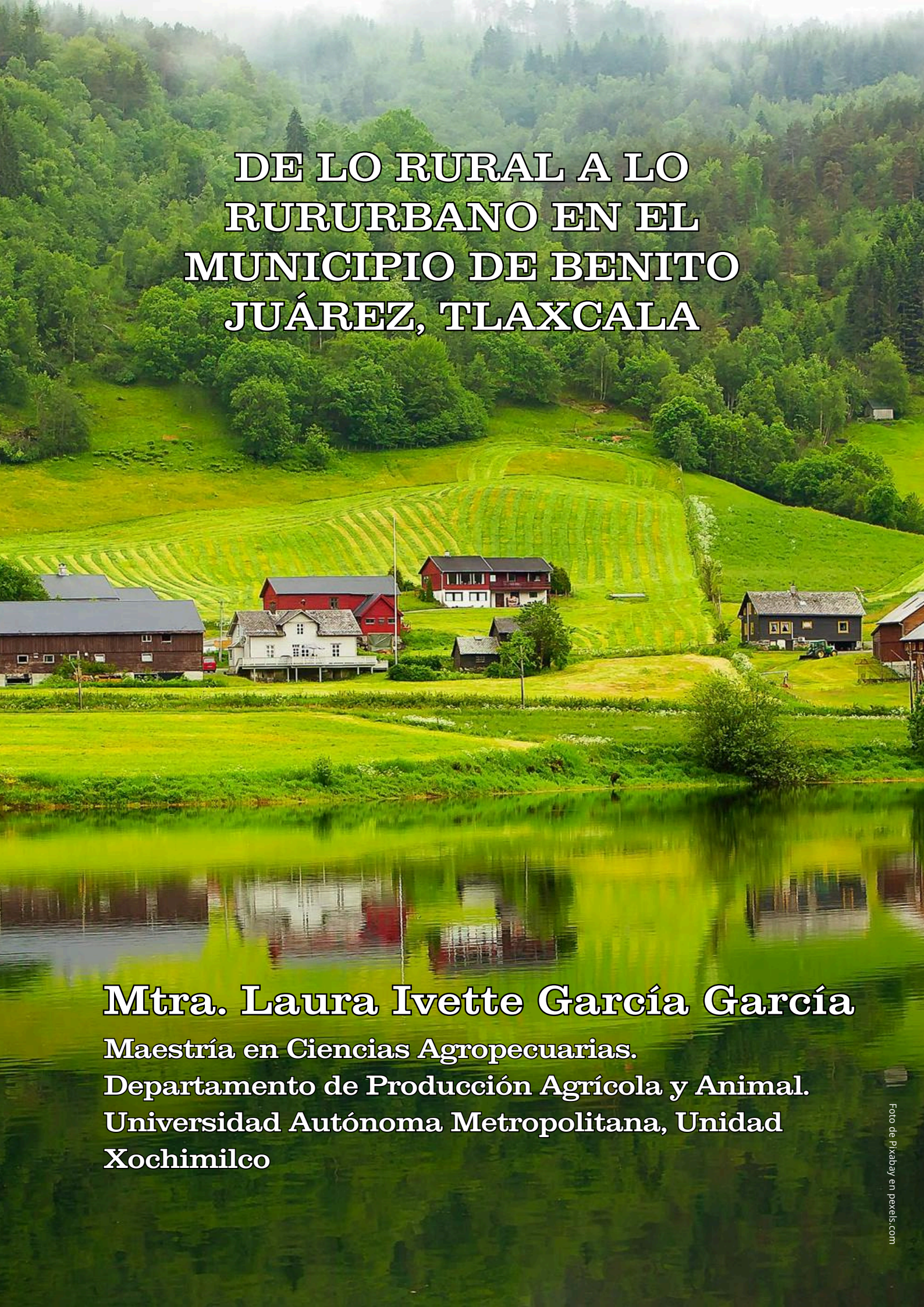
Tel. 5804-4600. Ext. 1144.

Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186.

C.P. 09310

Arbitraje

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



DE LO RURAL A LO RURURBANO EN EL MUNICIPIO DE BENITO JUÁREZ, TLAXCALA

Mtra. Laura Ivette García García

Maestría en Ciencias Agropecuarias.

Departamento de Producción Agrícola y Animal.

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad
Xochimilco

Abstract

In Benito Juárez, Tlaxcala, migration affects families in several ways. It causes the loss of social ties and family cohesion, as members disperse in search of better economic opportunities. Additionally, the abandonment of agricultural activities and the sale of farmland weakens the family economy and impacts food security. The role of women has increased in agricultural activities and at home. External factors, lack of support, and low incomes also contribute to this situation. Furthermore, the children of female farmers choose not to continue in agriculture and pursue their studies instead. Many agricultural and livestock lands have been sold, leading to the loss of the rural landscape. The low economic productivity of agriculture has prompted part of the population to migrate in search of better living conditions. The transition to urbanization has brought services such as stores, financial services, telecommunications, and public lighting.

Keywords: Rurality, Landscape, Agriculture, Rururban

Resumen

En Benito Juárez, Tlaxcala, la migración afecta a las familias de varias maneras. Causa la pérdida de vínculos sociales y cohesión familiar, ya que los miembros se dispersan en busca de mejores oportunidades económicas. Además, el abandono de las actividades agrícolas y venta de tierras agropecuarias debilita la economía familiar y afecta la seguridad alimentaria. El papel de la mujer ha aumentado en las actividades agropecuarias y en el hogar. Los factores externos, la falta de apoyo y los bajos ingresos también contribuyen a esta situación. Además, los hijos de las mujeres agricultoras

optan por no seguir en la agricultura y continúan sus estudios. Muchos terrenos agrícolas y pecuarios han sido vendidos, lo que ha llevado a la pérdida del paisaje campestre. La baja productividad económica de la agricultura ha llevado a que parte de la población migren en busca de mejores condiciones de vida. La transición hacia lo urbano ha traído servicios como tiendas, servicios financieros, telefonía y alumbrado público.

Palabras clave: Ruralidad, Paisaje, Agricultura, Rururbano.

Introducción

En los últimos años, la migración afecta a las familias del municipio de Benito Juárez, Tlaxcala, de varias maneras. En primer lugar, provoca la pérdida de vínculos sociales y de cohesión social, ya que los miembros de la familia se dispersan en busca de mejores oportunidades económicas. Además, el abandono de las labores agrícolas y la venta de terrenos agropecuarios debilitan la economía familiar y el patrimonio, afectando la seguridad y soberanía alimentaria. Por otro lado, el papel de la mujer ha aumentado en las actividades agropecuarias dedicándose a la ganadería y al mismo tiempo las tareas del hogar (Vieyra *et al.*, 2022 & García *et al.*, 2023).

La situación rural y la vida urbana en la época post-moderna son muy diferentes a la llamada cultura tradicional, que asignaba a las zonas rurales la agricultura de acuerdo con las reglas de gestión de la vida doméstica y comunitaria, así mismo la tradición urbana se ha transformado en esta época cambiando hasta el concepto de familia Sánchez, (H. A. (Ed.). (2005)); la idea generalizada de lo que sucede en el campo es el resultado

de factores externos tienen parte de razón de ser, aunque, por otra parte, el desconocimiento, la falta de apoyos y los bajos ingresos también han contribuido en este sentido, por lo cual, no hay posibilidad de considerar a los residentes de la ruralidad como motores del cambio global, ya que se presentan como subordinados de la globalización. Hasta cierto punto, se ha perdido la participación de las poblaciones rurales en la sociedad y la contribución de las "áreas urbanas como parte de la sociedad en la transformación de las ciudades existentes (camarero et al., 2020).

Se puede distinguir a la mujer del hombre, no son solo sus funciones orgánicas-naturales: gestación, maternidad, el cuidado de la prole y los quehaceres del hogar, además de la resiliencia y resistencia que debe mantener ante las adversidades que se presentan en su vida en las actividades agropecuarias, acciones que se pueden observar cuando uno sale de las ciudades.

La ruralidad: vida y desafíos.

La evolución de lo rural a lo urbano cada vez es más notoria; en las zonas rurales los paisajes que encontraremos serán del ámbito agropecuario, la identidad de estos lugares va de la mano con vínculos sociales y familiares, campos y pueblos pequeños. La ganadería y agricultura son un factor importante para la economía local.

Los pobladores de las zonas rurales dependen principalmente de los sectores agrícolas y pecuarios. Esto nos puede llevar a desafíos, como oportunidades laborales limitadas ya que su dependencia va directamente de los recursos naturales. La migración hacia grandes ciudades en busca de mejores oportunidades ha llevado a

problemas como el envejecimiento de la población. Sin embargo, hay un crecimiento en el desarrollo sostenible y la preservación del medio ambiente, con iniciativas para llevar a cabo prácticas agrícolas sostenibles y ecoturísticas.

Urbanismo

El urbanismo es crucial para el diseño y funcionamiento de las ciudades modernas, tomando en cuenta la planificación y la sostenibilidad. Uno de sus principales enfoques del urbanismo moderno es el desarrollo sostenible, implicando cambios con el mínimo impacto ambiental, promueven el uso eficiente de los recursos.

Las ciudades enfrentan desafíos como la creciente urbanización, el cambio climático y la presión sobre los recursos. Es por lo que debe adaptarse conforme a estrategias innovadoras y resilientes, como la adaptación al cambio climático.

Rururbano

El rururbanismo hace referencia a la combinación de características de lo rural y lo urbano. Esto ocurre en zonas que se encuentran en una transición de lo rural a lo urbano, creando un entorno único con características de ambos (rural - urbano); puede tener infraestructura de tipo urbano, como centros comerciales o de servicio, pero también teniendo características rurales, como los paisajes agrícolas y paisajes abiertos.

Migración

La migración en especial la mexicana empezó a tener visualización en la segunda mitad del siglo XIX, una de sus principales causas es la falta de oportunidades, obteniendo salarios bajos a diferencia de grandes ciudades o países; provocando la pérdida de vínculos sociales y de cohesión social, ya que los miembros de la familia

se dispersan en busca de mejores oportunidades económicas.

Los sistemas agropecuarios también se han visto afectados por la migración, la mujer empieza a tener un papel importante en las actividades agropecuarias, teniendo que ser pluriactivas, ya que los jefes de familia son los principales en migrar.

Conclusión

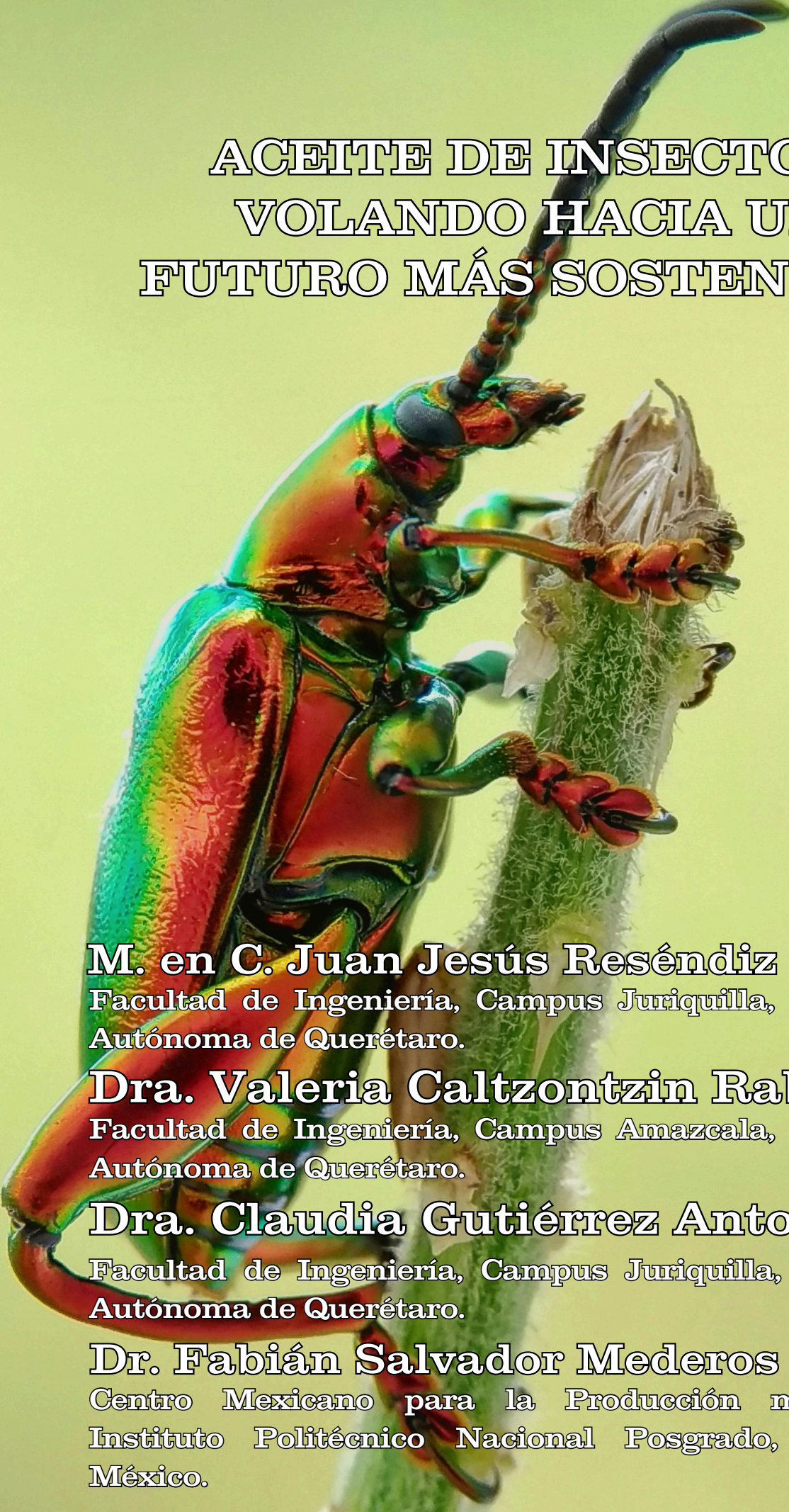
La población de Benito Juárez ha privilegiado la transición hacia lo urbano, impulsada en gran medida por el incremento económico de las familias. No obstante, es fundamental destacar que este crecimiento económico no se genera únicamente dentro del municipio, sino que una parte considerable proviene de los migrantes que trabajan en otros estados o incluso en el extranjero. Este fenómeno ha catalizado un cambio significativo en el paisaje y en la estructura socioeconómica local.

Uno de los efectos más evidentes de esta transición es la pérdida de agrobiodiversidad y la transformación del paisaje campestre. El avance hacia un entorno más urbano conlleva una reducción en las áreas destinadas a la agricultura y a la conservación de la biodiversidad local. La expansión de áreas residenciales y comerciales desplaza las tierras agrícolas, que

históricamente han sido el pilar de la vida rural y la identidad cultural de Benito Juárez.

Referencias

- [1] Camarero, L., de Grammont, HC y Quaranta, G. (2020). El cambio rural: una lectura desde la desagrarización y la desigualdad social. *Revista Austral de Ciencias Sociales*, (38), 191-211. <https://doi.org/10.4206/rev.austral.cienc.soc.2020.n38-10>
- [2] Cullingworth, J. B., & Nadin, V. (2006). The role of planning in urban development. *Journal of Urban Planning*, 10(2), 45-58. <https://doi.org/10.1080/0269745042000286010>
- [3] Food and Agriculture Organization. (2020). *Rural development*. Retrieved from <https://www.fao.org/rural-development/en/>
- [4] International Journal of Rural Management. (2022). *Urban-rural interfaces and regional development*. Retrieved from <https://journals.sagepub.com/home/ijr>
- [5] Marsden, T. K., & Murdoch, J. (2004). The role of the rural in the 21st century. *Sociologia Ruralis*, 44(3), 202-211. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9523.2004.00277.x>



ACEITE DE INSECTOS: VOLANDO HACIA UN FUTURO MÁS SOSTENIBLE

M. en C. Juan Jesús Reséndiz Luna

Facultad de Ingeniería, Campus Juriquilla, Universidad Autónoma de Querétaro.

Dra. Valeria Caltzontzin Rabell

Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala, Universidad Autónoma de Querétaro.

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

Facultad de Ingeniería, Campus Juriquilla, Universidad Autónoma de Querétaro.

Dr. Fabián Salvador Mederos Nieto

Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Instituto Politécnico Nacional Posgrado, Ciudad de México.

I. Introducción

La aviación enfrenta un gran desafío en la lucha contra el cambio climático, ya que contribuye al 2% de las emisiones globales de CO_2 , lo que equivale a 915 millones de toneladas. Según IRENA (2021), es esencial que sectores como la generación de energía y el transporte reduzcan sus emisiones (IRENA, 2021). La dificultad de implementar alternativas viables sin afectar la creciente demanda de viajes aéreos ha puesto a prueba la industria (EASA, 2019). Las propuestas para la descarbonización del sector, aunque prometedoras, aún son costosas y poco desarrolladas. En este contexto, el combustible sostenible de aviación (SAF) se presenta como una alternativa viable para reducir las emisiones de CO_2 .

México está en un proceso de transición energética para diversificar sus fuentes de energía y reducir la dependencia de los combustibles fósiles (Energía, 2017). La "Ley de promoción y desarrollo de bioenergéticos" busca fomentar el desarrollo sostenible, y el Fondo Sectorial CONACYT-SENER-

Sustentabilidad Energética ha promovido la creación de los Centros Mexicanos de Innovación en Energía, enfocados en el desarrollo de tecnologías para producir combustibles sostenibles de aviación (SAF). A pesar de estos esfuerzos, México aún enfrenta el reto de establecer un mercado consolidado para la producción y comercialización de bioturbosina.

Y, ¿qué es la bioturbosina o SAF? Son biocombustibles derivados de insumos renovables como biomasa, que cumplen las especificaciones técnicas de la turbosina convencional y que pueden mezclarse para garantizar un rendimiento seguro y eficiente en las turbinas (Energía, 2017). Respecto a su producción, se puede realizar por rutas avaladas por la Iniciativa de Combustibles de Alternativos para la Aviación Comercial (Tabla 1). Dentro de las que se encuentran: Fisher-Tropsch (ST), alcohol a biocombustible (queroseno) (ATJ) e hidrotratamiento con hidrógeno (HEFA) (CAAFI, 2020).

Tabla 1: Rutas avaladas para la producción de SAF (CAAFI, 2020).

Ruta	Materia prima
Fisher-Tropsch (ST)	Residuos de cultivos y sólidos
ATJ	Azúcares y almidones fermentados
HEFA	Grasas y aceites

Cada ruta de procesamiento tiene un rango permitido de mezcla de biocombustible con combustible convencional, por ejemplo, el SAF producido por HEFA puede mezclarse hasta en un 50%. Se destaca la posibilidad de usar diversos tipos de aceites para la producción de SAF mediante HEFA. Por lo anterior, el presente trabajo busca aportar información sobre las materias primas

y aceites usados en la producción de SAF, proponiendo el uso de aceite de insectos criados en residuos orgánicos como una alternativa para la generación de biocombustibles.

II. Biomásas para la producción de SAF por medio del hidrotratamiento

En la Tabla 2 se describen tres tipos de aceites más usados para la producción de SAF descritos por Energía (2016).

Con base en lo descrito en esta sección, se puede suponer que los residuos orgánicos no son una fuente prometedora para la obtención de SAF, pero ¿es posible extraer aceite de residuos orgánicos por otra manera más sustentable? En efecto pueden ser bioconvertidos por medio de tratamientos biológicos como los insectos para extraer el aceite que éstos acumulen.

III. Potencial biomasa para la producción de SAF a partir de

residuos orgánicos

En la naturaleza, cuando un ser vivo muere, su biomasa es gestionada por un complejo sistema de organismos, como hongos e insectos. Aunque este proceso puede parecer desagradable para muchos, estos organismos son esenciales en la descomposición y reciclaje de desechos en el medio ambiente. Su capacidad para transformar residuos en recursos valiosos resalta su importancia en los ecosistemas y en el desarrollo de soluciones sostenibles.

Tabla 2: Clasificación de aceites para la producción de SAF (Energía 2016).

Materia Prima	Ventajas	Desventajas
Primera generación		
Cultivos comestibles como la soya, palma, canola, girasol, entre otros	Pureza, que elimina la necesidad de pretratamientos y su disponibilidad.	Puede amenazar la seguridad alimentaria, ya que compiten con el consumo humano. Su producción requiere el uso de tierras y agua.
Segunda generación		
Cultivos no comestibles como el ricino, <i>jatropha</i> y camelia.	Se pueden producir en mayor escala y de bajo costo.	Competencia de uso de suelo y agua con los cultivos comestibles.
Grasas de animales y aceites residuales.	No compite por uso de suelo o agua.	Posibles problemas para homogeneizar. Requiere filtración de sólidos. Hay mucha variabilidad por recolección.
Residuos orgánicos (cultivos forestales o urbanos).	Alternativa a la disposición de residuos.	Poco aceite, principal uso para producción de combustibles sólidos. Rendimientos bajos y con largas rutas de procesamiento.
Tercera generación		
Microalgas	Depende de la especie, pero pueden contener entre 70 y 85% de aceite. Ya hay pruebas con SAF en vuelos.	Alto costo por condiciones específicas.

Siddiqui *et al.* (2024) menciona que el tratamiento con insectos provee fertilizantes, proteínas, y biocombustibles. Entre los más estudiados para tratar residuos se encuentran: *Acheta doméstica*, *Musca doméstica*, *Tenebrio molitor*, *Hermetia illucens*, entre otros. Entre estos organismos, *Hermetia illucens*, conocida como la Mosca Soldado Negra, destaca por su capacidad para bioconvertir, en condiciones óptimas, hasta un 70% de la materia orgánica en un 20-40% de aceite por cada kilogramo de materia seca (Jung *et al.*, 2022). Además, produce productos de valor agregado como proteína, quitina y aceite.

Entonces ¿Es posible producir el SAF de aceite proveniente de insectos? Ya se ha logrado convertir en biodiésel por medio de transesterificación (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2012), entonces, usando el proceso HEFA sería posible producir bioturbosina. Es crucial destacar varios aspectos que deben ser considerados para fomentar la investigación sobre la bioconversión con insectos, como la aceptación social, la necesidad de satisfacer la demanda de biocombustibles, el financiamiento económico y, especialmente, las normativas y leyes. El aceite extraído de insectos se presenta como una alternativa prometedora, ya que no enfrenta las dificultades asociadas con las materias primas de primera y tercera generación en la producción de SAF (Siddiqui *et al.* 2024). Al ver los residuos desde una nueva perspectiva, no como simples desechos, se abren oportunidades para un manejo más sostenible y eficiente.

IV. Conclusión

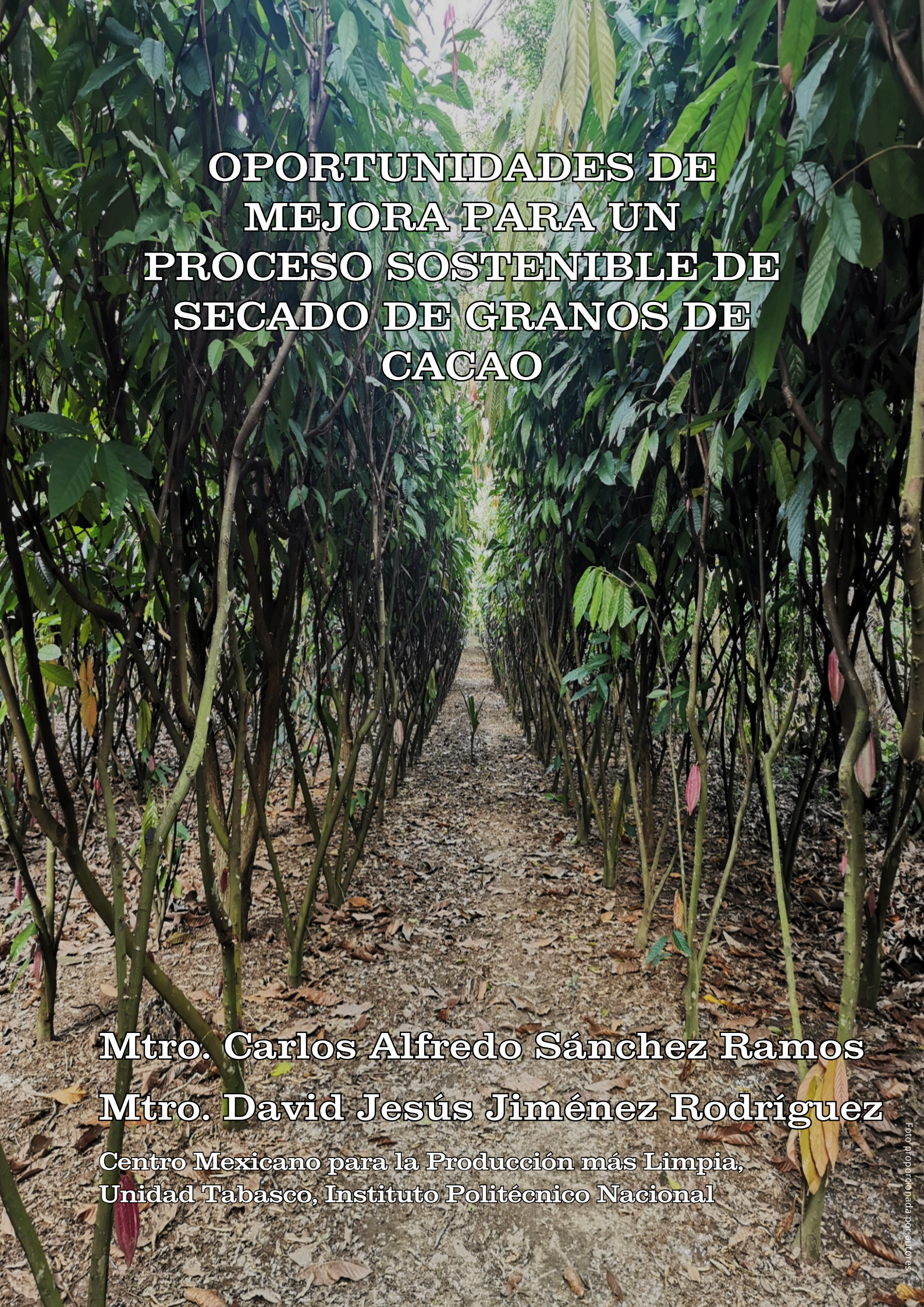
El sector del transporte, en especial la aviación, enfrenta el desafío de reducir su dependencia de los combustibles

fósiles y sus emisiones de gases de efecto invernadero. La bioturbosina se presenta como una de las soluciones más prometedoras para la descarbonización de la aviación, destacándose el proceso HEFA como una vía rápida para obtener SAF a partir de aceites. Una alternativa innovadora y viable es el uso de residuos orgánicos procesados por insectos, que no solo ayudan a reducir los desechos, sino que también generan biomasa y biocombustibles. Este enfoque promueve un modelo de economía circular, aprovechando los residuos para crear productos de valor. No obstante, aún persisten retos importantes para lograr que esta revalorización de residuos tenga un impacto relevante en el mercado de la aviación. La colaboración entre el sector académico y el privado se centra en superar estos desafíos y explorar oportunidades que hagan posible la producción de SAF a partir de aceites de insectos. Esta iniciativa busca no solo reducir los residuos orgánicos, sino también impulsar un futuro más sostenible para el transporte aéreo y el medio ambiente global.

Referencias

- [1] CAAFI, CAAFI. (2020). CAAFI - Focus Area - Fuel Qualification. Fuel Qualification. https://www.caafi.org/focus_areas/fuel_qualification.html
- [2] EASA. (2019). Sustainable Aviation Fuel “Facilitation Initiative. 1–63. https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/sustainable_aviation_fuel_facilitation_initiative_0.pdf
- [3] Energía, S. de. (2016). Reporte de Inteligencia Tecnológica BIOTURBOSINA. Secretaria

- de Energía. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/324018/Inteligencia_Tecnologica_Bioturbosina_Final.pdf
- [4] Energía, S. de. (2017). *Mapa de Ruta Tecnológica Bioturbosina. Secretaria de Energía*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/324219/MRT_Bioturbosina_Final.pdf
- [5] IRENA. (2021). Reaching Zero With Renewables BIOJET FUELS. In The International Renewable Energy Agency (IRENA).
- [6] Jung S, Jung JM, Tsang YF, Bhatnagar A., Chen W. H., Lin K. Y. A., & Kwon E. E. (2022). Biodiesel production from black soldier fly larvae derived from food waste by non-catalytic transesterification. *Energy*, 238.
- [7] Manzano-Agugliaro F, Sanchez-Muros MJ, Barroso FG, Martínez-Sánchez A, Rojo S, & Pérez-Bañón C. (2012). Insects for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3744–3753.
- [8] Siddiqui SA, Harahap IA, Osei-Owusu J, Saikia T, Wu YS, Fernando I, Perestrelo R, & Câmara JS. (2024). Bioconversion of organic waste by insects – A comprehensive review. *Process Safety and Environmental Protection*, 187(April), 1–25.



OPORTUNIDADES DE MEJORA PARA UN PROCESO SOSTENIBLE DE SECADO DE GRANOS DE CACAO

Mtro. Carlos Alfredo Sánchez Ramos
Mtro. David Jesús Jiménez Rodríguez

Centro Mexicano para la Producción más Limpia,
Unidad Tabasco, Instituto Politécnico Nacional

Abstract

Grain drying is a widely used method for preserving agricultural products. This allows the organoleptic properties of the grains to be maintained for a long time, reducing enzymatic activity and guaranteeing that the product reaches the industrial process in good condition. The temperature and speed of the drying air are critical parameters in the final quality of the cocoa beans. There are various technologies that allow grain drying, in the southeast of Mexico the most used are the "samoa" type convective dryers because they have a simple and economical construction for companies. The main deficiencies and problems found in convective type cocoa dryers are high consumption of electrical energy, lack of controls and automation, losses of thermal energy, high consumption of L.P. gas. There are several areas of opportunity to improve the efficiency of cocoa dryers and contribute to making the cocoa bean drying process sustainable.

Keywords: Grain dryer, drying process, industrial sustainability, energy efficiency.

Resumen

El secado de granos es un método muy utilizado para la conservación de productos agrícolas, esto permite que las propiedades organolépticas de los granos se mantengan por un tiempo prolongado, reduciendo la actividad enzimática y garantizando que el producto llegue al proceso industrial en buenas condiciones. La temperatura y la velocidad del aire de secado son parámetros críticos en la calidad final de los granos de cacao. Existen diversas tecnologías que permiten el secado de granos, en el sureste de México la más utilizada son las secadoras convectivas tipo "samoa" debido a que tienen

una construcción sencilla y económica para las empresas. Las principales deficiencias y problemáticas encontradas en secadoras de cacao de tipo convectivo son: alto consumo de energía eléctrica, falta de controles y automatización, pérdidas de energía térmica, alto consumo de gas L.P. Existen diversas áreas de oportunidad para mejorar la eficiencia de las secadoras de cacao y contribuir a que el proceso de secado de granos de cacao sea sostenible.

Palabras clave: Secador de granos, proceso de secado, sostenibilidad industrial, eficiencia energética.

Introducción

Cacao, cuyo nombre científico significa "alimento de los dioses" en griego (*Theobroma cacao*), es un árbol tropical de hoja perenne cultivado por sus semillas comestibles. El cacao es un producto muy apreciado en el mercado internacional. Sus derivados (chocolate, mantequilla, licores, alimento en polvo, productos cosméticos, etc.) son muy demandados y, por tanto, de alto valor comercial. Además, su industrialización representa una importante fuente de ingresos y empleos. Su uso diversificado, tanto alimentario como no alimentario, ofrece mayores oportunidades de mercado.

Un proceso industrial está constituido por una serie de etapas, en cada una de ellas ocurre una transformación de materia prima e insumos obteniendo productos, subproductos, residuos y desechos. Los procesos industriales sostenibles son procesos que potencian el aprovechamiento de la materia prima y los insumos (energía eléctrica, combustible, agua, etc.) y minimizan o eliminan la presencia de residuos y desechos (Loayza y Silva, 2013), impactando lo menos posible

al medio ambiente, contribuyendo al cumplimiento de las políticas ambientales y el desarrollo sostenible.

La sostenibilidad implica un enfoque integral que considera los aspectos ambientales, sociales y el desarrollo económico, una forma de mejorar la sostenibilidad de una empresa u organización es incrementar la eficiencia energética de sus equipos, sistemas y procesos productivos. La eficiencia energética es una medida fundamental para mantener un crecimiento saludable en las empresas a través de instalaciones más eficientes (Cicone *et al.*, 2007), también nos permite coadyuvar a cuatro grandes retos del sector energético mundial: el cambio climático, la calidad y seguridad del suministro, la evolución de los mercados y la disponibilidad de las fuentes de energía. Una de las principales maneras de ahorrar energía es a través de buenas prácticas aplicadas a la forma de operación y el uso de los equipos, lo cual no requiere ninguna inversión; de igual forma es posible contribuir al ahorro de energía, mejorando la eficiencia energética de nuestros sistemas o equipos a través de la sustitución de estos por más eficientes o realizando modificaciones o mejoras menores que puedan impactar positivamente en la eficiencia energética.

La mayoría de los granos de cacao producidos en todo el mundo son producidos por pequeños agricultores y luego combinados en lotes cada vez mayores hasta llegar al fabricante de chocolate. Dado que las actividades de los agricultores son responsables de definir muchas de las características cualitativas de los granos de cacao, es fácil imaginar que los fabricantes de chocolate reciben a menudo lotes muy

heterogéneos de granos de cacao debido a las diversas prácticas agrícolas (Saltini *et al.*, 2013).

El secado de productos alimenticios ha sido una técnica de conservación de alimentos desde la antigüedad. El secado es una tecnología de procesamiento generalizada y accesible que implica principalmente la eliminación del agua de los productos alimenticios. El objetivo principal del proceso de secado es reducir la actividad del agua del material para prevenir el crecimiento de microorganismos y reducir la actividad de la enzima, prolongando así la vida útil a temperatura ambiente. El desafío del secado del cacao ha sido utilizar eficientemente las fuentes de energía disponibles para reducir la humedad a niveles de almacenamiento seguros y, al mismo tiempo, producir granos de calidad aceptable.

El presente trabajo busca resaltar la importancia del proceso de secado en la conversión de los granos de cacao en productos derivados, describir las principales fuentes de desperdicio de energía en las secadoras, analizar las áreas de oportunidad para mejorar el proceso de secado de granos de cacao y reducir los desperdicios de energía. Se busca que los centros de acopio de cacao realicen el secado de granos de cacao mediante un proceso con tendencia a la sostenibilidad.

Proceso de beneficiado del cacao

El proceso de beneficiado del cacao consiste en lo siguiente:

La fermentación y el secado son las principales operaciones para la preservación de los granos de cacao.

La conservación de granos implica principalmente la extensión del período de almacenamiento de un producto con



Figura 1: Postcosecha del cacao para su conservación. Elaboración propia.

la calidad deseada. Los productos agrícolas como el cacao se cosechan gran parte del año y los granos deben secarse inmediatamente después de la fermentación para reducir las pérdidas de masa y evitar el deterioro.

La fermentación de los granos de cacao frescos generalmente se realiza en cajas de madera durante aproximadamente 5 a 7 días, dependiendo de las condiciones de los granos. Durante la fermentación, la temperatura de los granos generalmente aumenta desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente 50°C a 55°C debido a la reacción de oxidación exotérmica (Oke y Omotayo, 2012). La fermentación del cacao tiene varios objetivos: Eliminar el embrión de la semilla, fijar el sabor y el aroma, reducir el amargor y la

astringencia, separar la pulpa (mucílago) del cacao permitiéndole escurrir para mejorar el proceso de secado.

Después de la fermentación, los granos se secan hasta un contenido de humedad del 5% al 8% antes de empaquetarlos, almacenarlos, venderlos o transportarlos. Esto previene la infestación de moho y permite la continuación de algunos cambios químicos que ocurrieron durante la fermentación y mejora el desarrollo del sabor. El secado es un proceso térmico complejo en el que se produce simultáneamente una transferencia inestable de calor y humedad. Este complejo proceso depende principalmente de los siguientes parámetros:



Figura 2: Parámetros principales que intervienen en el secado de granos de cacao. Elaboración propia.

La velocidad de secado es crítica para la calidad final de los granos de cacao, una velocidad de secado muy rápida da como resultado granos excesivamente ácidos que se endurecen y se arrugan, si el secado demora más de 7 días, puede ocurrir contaminación por moho. En el proceso de secado, se suministra calor

para la vaporización del agua con aire forzado. Este proceso mediante el cual se produce la vaporización del agua como resultado del suministro de calor al producto se conoce como transferencia simultánea de calor y masa. En muchos procesos, un secado inadecuado puede provocar daños irreversibles a la calidad

del producto y, por tanto, un producto no vendible. Estas son consecuencias probables de un secado insuficiente o excesivo del producto cuando no se aplican condiciones de secado adecuadas, como la temperatura del aire de secado.

Tipos de secado de cacao

Las técnicas de secado varían entre los productores de cacao y van desde los métodos tradicionales de secado natural al sol hasta los métodos de aire caliente artificial. En la actualidad, el secado al sol es utilizado principalmente por los pequeños productores de cacao debido a su simplicidad, su bajo costo y la necesidad de luz solar directa, que es abundante, regular y gratuita. El secado artificial con aire caliente (convección forzada) requiere energía mecánica o eléctrica para proporcionar flujos de aire. Se trata de la transferencia de energía térmica entre un fluido en movimiento y la superficie del producto.

Los métodos tradicionales para secar productos agrícolas se han empleado ampliamente en todo el mundo. Los métodos más comunes son la luz solar directa o indirecta y la quema de madera. Aunque estos métodos son baratos, existen problemas asociados con ellos, como la mala calidad de los productos secos, poco o ningún control sobre el proceso de secado, posible contaminación del producto por suciedad, contaminación por desechos de animales, contenido de humedad relativamente alto debido a variaciones inconsistentes de temperatura, gran espacio de tierra necesario para esparcir los productos, infestación por insectos o moho, exposición del producto a la lluvia y al viento y trabajo intensivo debido al giro constante de los productos y los movimientos de las bandejas de secado

durante las lluvias.

El secado artificial con aire caliente es uno de los métodos más comunes para el secado de productos agrícolas, alimentos y plantas medicinales. Las desventajas de utilizar el secado con aire caliente incluyen pérdidas considerables de energía térmica y baja conductividad térmica, endurecimiento superficial del material, tiempos de secado relativamente largos, así como encogimiento del producto secado. La limitación más importante de los sistemas de secado con aire caliente es su baja eficiencia de secado debido a las pérdidas por convección en el calentamiento y transporte del fluido de trabajo.

El uso de secadores artificiales para secar los granos de cacao tiene algunas desventajas: los granos de cacao son más frágiles y producen granos más agrietados o rotos, el secado artificial de los granos de cacao también puede considerarse económicamente costoso debido al uso de electricidad y/o combustible. Dependiendo de la idoneidad, el valor económico y la calidad del producto final, se selecciona el método de secado (Guda *et al.*, 2017). A continuación, se muestra un diagrama con las diferentes tecnologías utilizadas para secar granos de cacao:

Principales problemáticas existentes en el proceso de secado de granos de cacao y oportunidades de mejora

A continuación, se muestra un diagrama con las principales problemáticas y sus causas, existentes en las secadoras de cacao, esto aplica para la mayoría de los tipos de secadoras de granos:

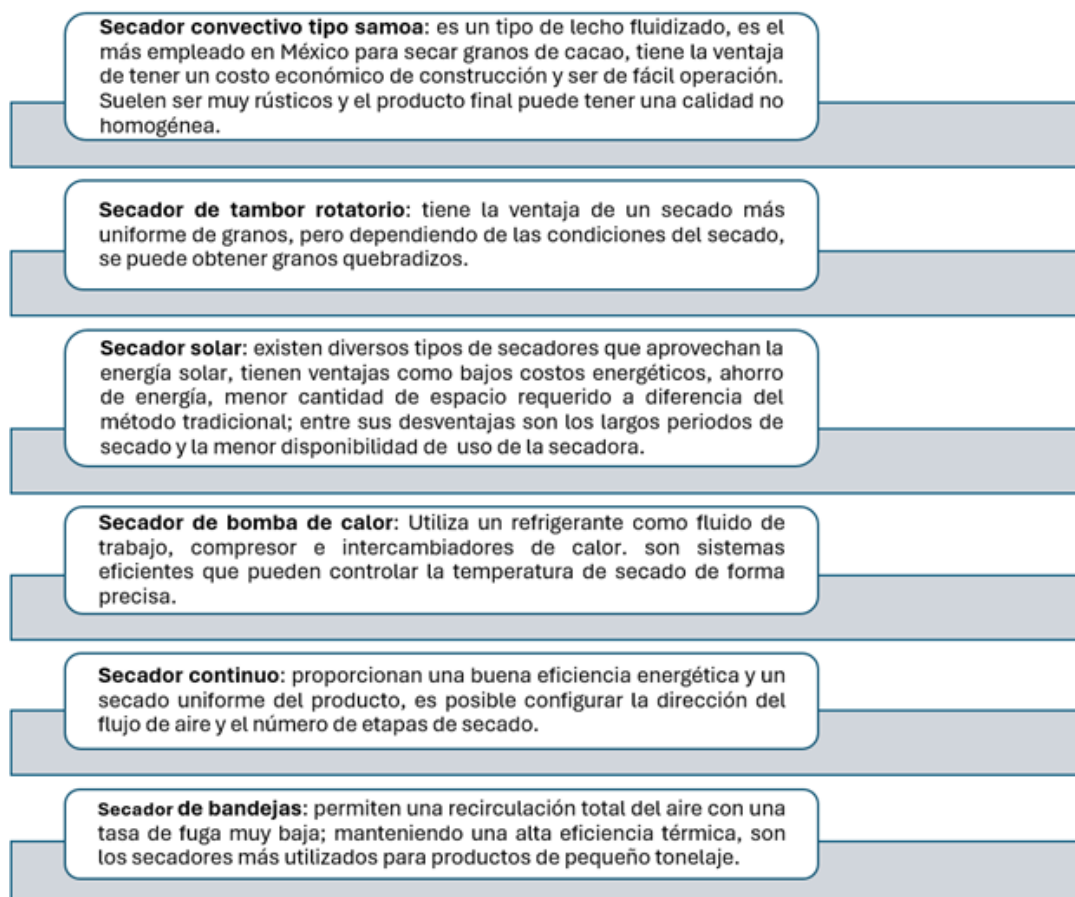


Figura 3: Tipos de secadores de granos de cacao. Elaboración propia.

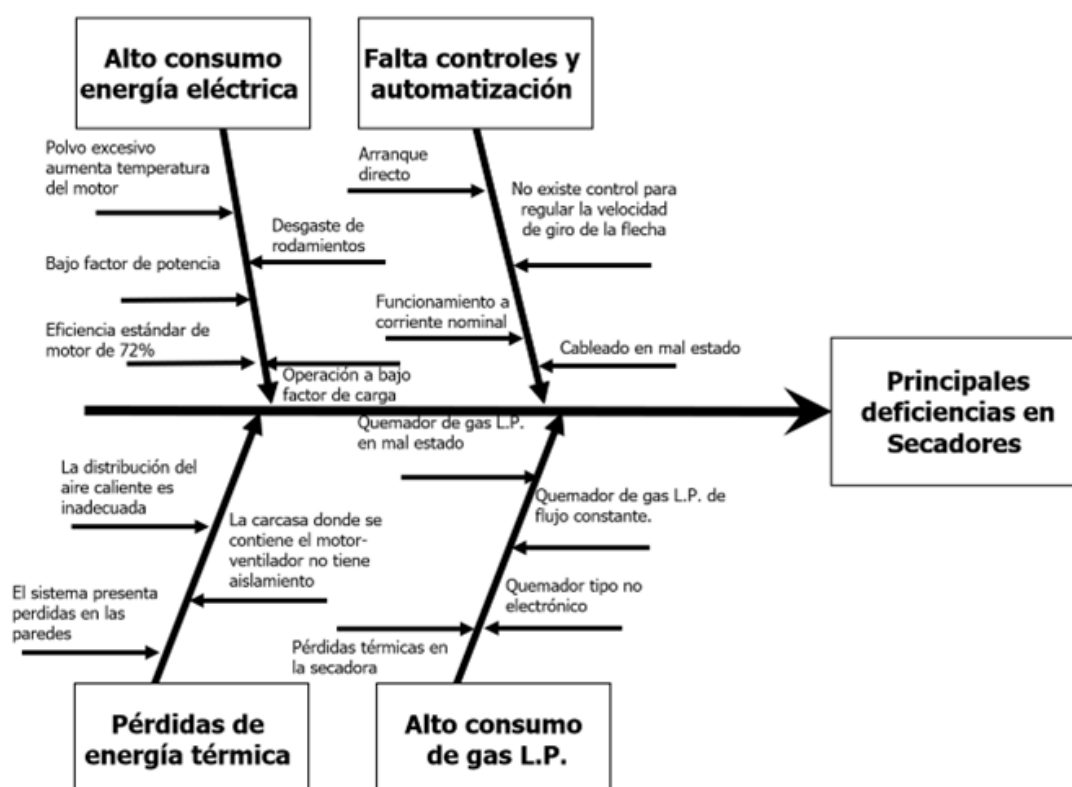


Figura 4: Principales deficiencias y problemáticas de las secadoras de cacao. Elaboración propia.

Mediante termografía se ha identificado la forma en la que se distribuye el calor en una secadora de tipo samoa encontrando lo siguiente:

- La distribución del aire caliente es inadecuada, presentando zonas con demasiada variación de temperatura, haciendo con esto que el secado de los granos de cacao sea mejor en algunas zonas que en otras, esto repercute directamente en la homogeneidad del secado y la calidad final del producto.
- Se aprecia que el quemador pudiera estar funcionando de manera inadecuada, ya que la flama se aprecia en color naranja en algunas partes, lo que indica condiciones de

una combustión incompleta.

- Existen pérdidas de energía térmica debido a que la carcasa donde se contiene el motor-ventilador no tiene aislamiento térmico y la unión al conducto de aire de entrada es deficiente.
- En las paredes de la samoa existen perdidas térmicas por conducción y convección debido a que no poseen aislamiento térmico en las superficies.

De manera ilustrativa en la figura 5 se observa se observa una termografía general donde se visualiza la distribución de temperaturas del lecho de secado:

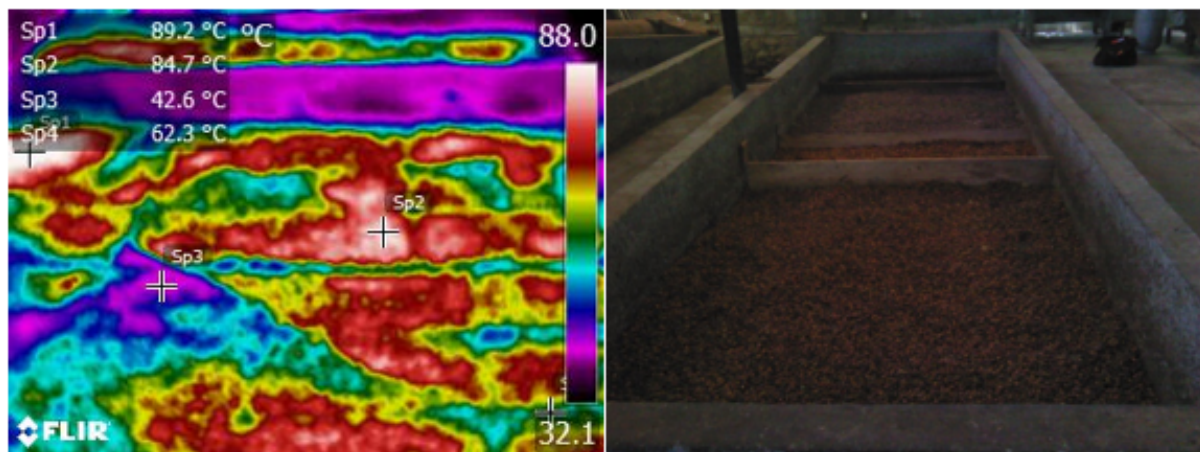


Figura 5: Imagen térmica general de la distribución de temperaturas de la secadora e imagen fotográfica. Elaboración propia.

Se observa que no existe homogeneidad en la distribución de temperaturas del lecho de secado de la secadora, en las diferentes zonas del lecho de secado la temperatura es variable encontrando zonas desde 40 °C hasta 89 °C. La temperatura del aire de salida de la rejilla es en promedio 74.3 °C.

A continuación, se muestra un diagrama con las mejoras de mayor relevancia en

las secadoras de granos de cacao:

Conclusiones

El presente trabajo permitió conocer detalles sobre el proceso que se realiza al cacao para poder almacenarlo y/o resguardarlo, sin que los granos de cacao presenten problemas de degradación o daño, dando tiempo a distribuirlo hacia

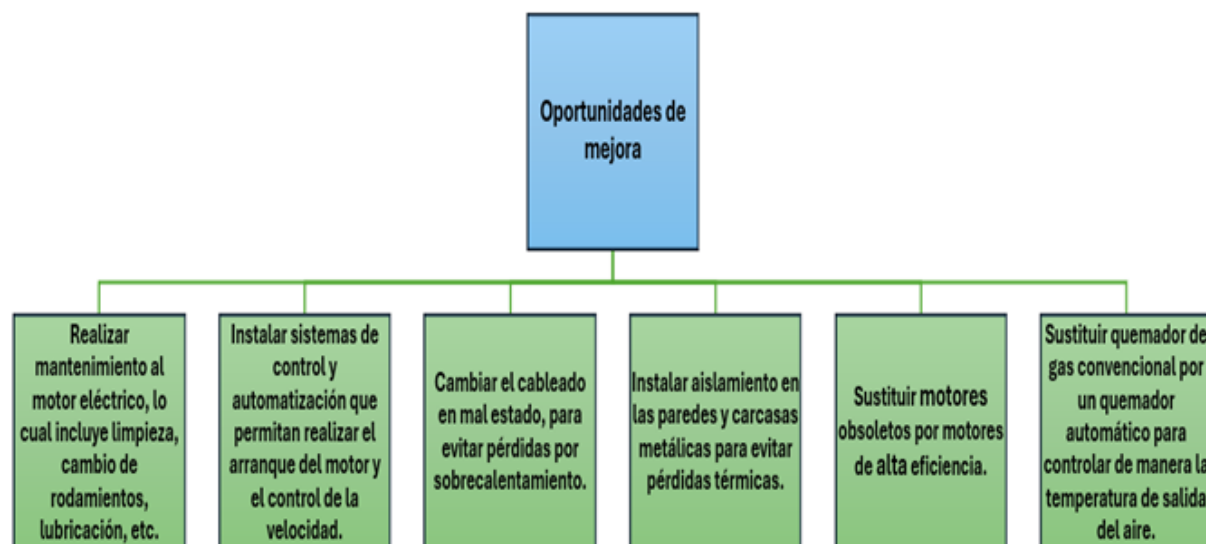


Figura 6: Principales áreas de oportunidad identificadas en las secadoras de granos de cacao. Elaboración propia.

los centros donde se produce su procesamiento y conversión en subproductos; se identificaron los principales parámetros que intervienen en el proceso de secado siendo la humedad del producto, la temperatura y velocidad del aire de secado, los más principales, se analizaron los tipos de secado y las tecnologías empleadas, destacando en México para secar granos de cacao las secadoras convectivas de tipo samoa por su facilidad de construcción y de operación. Se enlistaron las principales problemáticas de las secadoras de cacao y sus oportunidades de mejora, que de implementarse lograrían que el proceso de secado de granos de cacao sea más sostenible, permitiendo ahorros tanto energéticos como económicos y una reducción de los impactos indirectos al medio ambiente.

Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional por apoyar con el financiamiento del proyecto SIP 20241516 de convocatoria interna, denominado: “Estudio del desempeño del proceso y uso de la

energía mediante la simulación de un secador de granos de cacao”.

Referencias

- [1] Cicone, D., Correa, F., Morales, M., y Baesso, J., Atratividade financeira e tomada de decisão em projetos de eficiência energética, Brasileira de Energia, 13(2), 129-146, 2007.
- [2] Guda, P., Gadhe, S., y Jakkula, S., Drying of Cocoa Beans by Using Different Techniques, International Journal of Agriculture Innovations and Research, 859-865, 2017.
- [3] Loayza, J., y Silva, V., Los procesos industriales sostenibles y su contribución en la prevención de problemas ambientales, Industrial Data, 108-117, 2013.
- [4] Oke, D., y Omotayo, K., Effect of forced-air artificial intermittent drying on cocoa beans in South-Western Nigeria, Journal of Cereals and Oil seeds, 1-5, 2012.
- [5] Saltini, R., Akkerman, R., y Frosch, S., Optimizing chocolate production

through traceability: A review of
the influence of farming practices

on cocoa bean quality, Food Control,
167-187, 2013.

LA NIXTAMALIZACIÓN Y EL MAÍZ

Ing. Misael García Pérez

Nacional de México / Instituto Tecnológico de Veracruz,
Ingeniero Bioquímico

Lic. Gustavo Armando Sánchez Rosas

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de
Veracruz, Licenciado en Nutrición

Dra. Rosa María González Amaro

SECIHTI-Instituto de Ecología, A.C., Doctora en Ecología y
Desarrollo sustentable

Dra. Claudia Y. Figueroa Hernández

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de
Veracruz, Doctora en Biotecnología

Dr. Oscar González Ríos

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de
Veracruz, Doctor en Ciencias en Alimentos

Dr. Zorba Josué Hernández Estrada

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de
Veracruz, Doctor en Ciencias de los Materiales

Abstract

Nixtamalization is an ancestral process of Mesoamerican origin that consists of cooking corn in an alkaline solution, generally with lime, to facilitate milling. This treatment increases the bioavailability of nutrients such as calcium and certain amino acids and reduces nixtamalized corn products' aflatoxin content. This process is mainly used in Mexico to produce a wide variety of products, including tortillas, which are the main ingredient in the Mexican diet. The importance of corn goes beyond food, due to its cultural symbol in Mexico, where there are 59 native maize landraces. On the other hand, traditional nixtamalization has environmental challenges due to its high-water consumption and generation of alkaline waste. In response to this problem, alternative methods have been developed that seek to improve the efficiency of the process and reduce its ecological impact, which are areas of interest for both industry and scientific research, as well as for crop sustainability and biodiversity preservation.

Keywords: Corn, nixtamalization, Mexican culture, nutrients.

Resumen

La nixtamalización es un proceso ancestral de origen mesoamericano que consiste en la cocción del maíz en una solución alcalina, generalmente con cal, para facilitar su molienda. Este tratamiento aumenta la biodisponibilidad de nutrientes como el calcio y ciertos aminoácidos, además, disminuye el contenido de aflatoxinas en los productos de maíz nixtamalizado. Este proceso se utiliza principalmente en México para elaborar una gran variedad de productos, entre ellos las tortillas, que son el principal ingrediente de la dieta

mexicana. La importancia del maíz va más allá de la alimentación, debido a que es un símbolo cultural en México, en donde se tienen 59 razas de maíz nativas. Por otra parte, la nixtamalización tradicional tiene desafíos ambientales debido a su alto consumo de agua y generación de residuos alcalinos. En respuesta a esta problemática se han desarrollado métodos alternativos que buscan mejorar la eficiencia del proceso y reducir su impacto ecológico, siendo áreas de interés tanto para la industria como para la investigación científica, y la sostenibilidad del cultivo y preservación de la biodiversidad.

Palabras clave: Maíz, nixtamalización, cultura mexicana, nutrientes.

Nixtamalización

La palabra nixtamal se deriva de los términos náhuatl *nixtli* (cenizas) y *tamalli* (masa). La nixtamalización es una práctica ancestral transmitida por generaciones con el fin de preparar el maíz para consumo humano. Es tanta su importancia en la nutrición humana, que en 2010 fue declarada Patrimonio Inmaterial de la Humanidad por la UNESCO. La nixtamalización es un proceso térmico alcalino en el que los granos de maíz se cuecen de 20 a 40 minutos a temperaturas que oscilan entre 80 y 100 °C, en una solución de hidróxido de calcio (cal), a una concentración de 1 a 2% en agua. Tras la cocción, los granos reposan en esta mezcla de 8 a 12 horas, para después lavar el maíz con el objetivo de remover el exceso de cal y parte del pericarpio desprendido (Fig 1) (Paredes-López *et al.*, 2009). El resultado de este proceso es el llamado nixtamal, el cual se muele en metate, molino de muelas o molino de piedras para obtener una masa utilizada en la elaboración de tortillas, totopos, tamales, atoles y una variedad

de antojitos a base de masa frita, así espesante. como en la preparación de guisos como

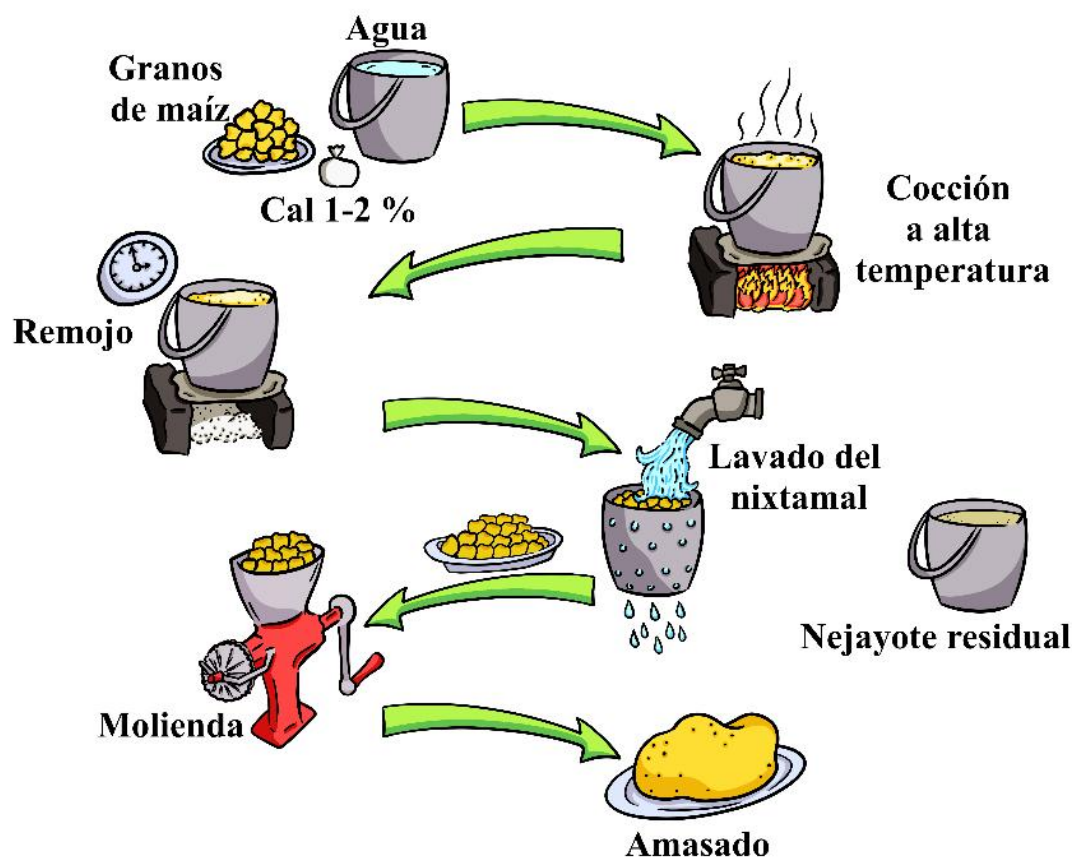


Figura 1: Proceso de nixtamalización clásico.

TORTILLA DE MAÍZ

Entre los productos de maíz nixtamalizados, las tortillas son las más populares y consumidas en México, con un promedio de 79.5 kg per cápita al año en zonas rurales y 56.7 kg en zonas urbanas. Este alimento tiene sus raíces en el México prehispánico, donde se conocía como *tlaxcalli*, que significa “*cosa cocida*”. Surgió de la necesidad de alimentar al ejército tlaxcalteca, que estaba constantemente en conflicto con los aztecas (Fig 2). Tras la conquista española, se le dio el nombre de “*tortilla*”,

derivado del diminutivo de “*torta*”, que significa “*pan de maíz*” (Figueroa Cárdenas, 2022).

La tortilla es un disco delgado de masa con un diámetro de 160 a 250 mm y un grosor de 1 a 2 mm, que se cuece sobre un comal a unos 250 °C. Sus propiedades sensoriales y fisicoquímicas dependen del tipo de maíz utilizado y del proceso de nixtamalización. Existen variantes de la tortilla, como las tlayudas de Oaxaca, que son considerablemente más grandes y se utilizan en la preparación de

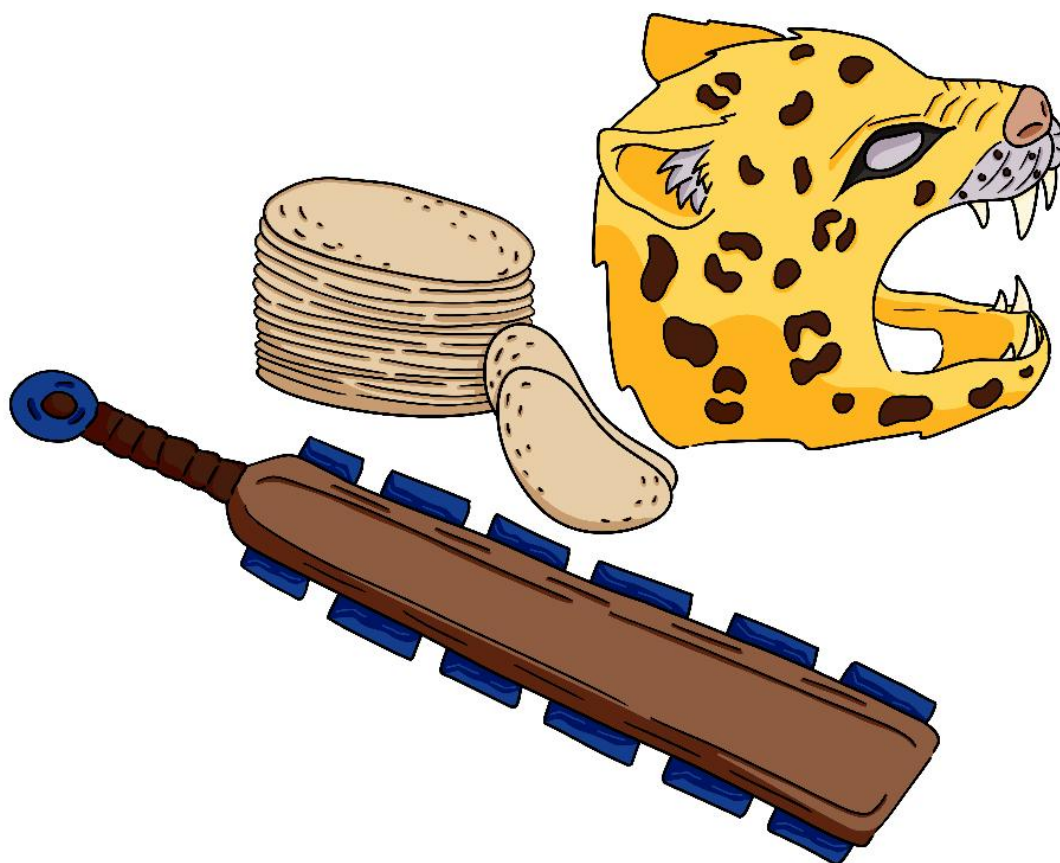


Figura 2: La tortilla como alimento del ejercito tlaxcalteca.

diversos platillos. La tortilla es muy versátil en la cocina mexicana ya que puede servir como acompañamiento en una variedad de guisos o como ingrediente principal en platillos como totopos, tacos, tostadas, enchiladas, chilaquiles, entre otros. (Lind y Barham, 2004).

A lo largo del tiempo, las actividades religiosas y culturales asociadas con la elaboración de la tortilla han evolucionado, aunque en algunas zonas rurales todavía se mantienen arraigadas a las prácticas ancestrales. Es por ello, en las zonas urbanas la tortilla ha perdido en gran medida su simbolismo tradicional y místico para convertirse en un producto industrializado que busca solamente satisfacer la demanda alimentaria

(Lind y Barham, 2004). Estas tortillas industrializadas elaboradas con harina de maíz nixtamalizado generalmente contienen aditivos como gomas, ácidos grasos, vitaminas, minerales y conservadores.

El Maíz

El maíz es uno de los cereales de mayor importancia a nivel mundial. En 2024 se produjeron 1,214,345,000 ton (Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América, 2024). En México, el maíz es un cultivo emblemático, no solo por su valor económico y nutricional, sino también por la gran diversidad genética que posee, además, de ser un símbolo cultural arraigado profundamente en la historia y la identidad del país.

La planta de maíz pertenece la familia de las gramíneas, es versátil y se desarrolla en diferentes altitudes sobre el nivel del mar y en diversos climas, por lo que tiene una gran biodiversidad en el mundo. En América Latina hay

220 razas y como se observa en la Figura 3, en México contamos con 59 razas nativas, de las cuales algunas son pigmentadas y ricas en compuestos fenólicos, carotenoides y antocianinas (CONABIO, 2020).

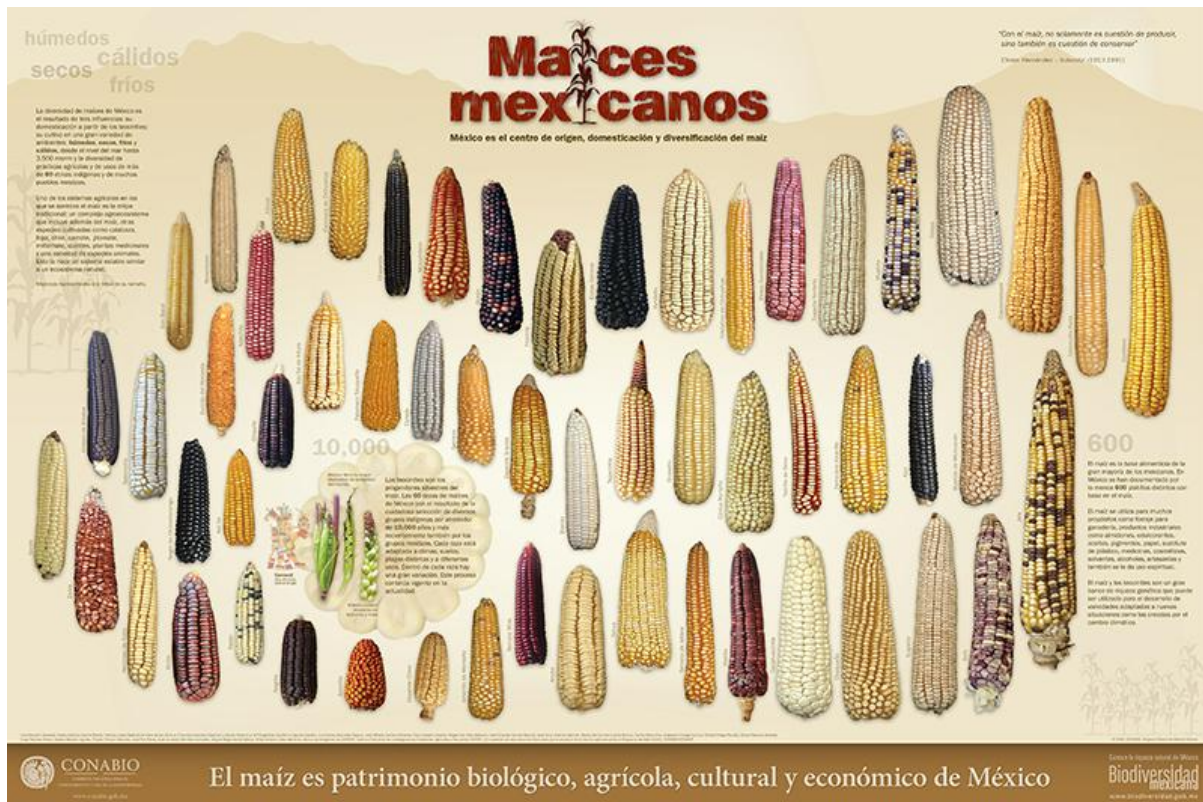


Figura 3: Cartel de maíces mexicanos. (CONABIO, 2020).

Ventajas de la nixtamalización

El proceso de nixtamalización no solo facilita la molienda de los cereales, debido a que los hace más suaves, sino que también permite mejorar la disponibilidad de nutrientes que, en su forma natural, no son eficientemente aprovechados por el cuerpo humano. Después de que el maíz es nixtamalizado, se observa un aumento en la biodisponibilidad de algunos nutrientes, como el calcio, que puede llegar a ser hasta trece veces mejor aprovechado, la fibra dietética soluble y aminoácidos esenciales (ej. la niacina, lisina y el triptófano); de esta manera, el consumo de productos

hechos a partir de maíz nixtamalizado contribuye a prevenir la incidencia de enfermedades como la pelagra y a combatir ciertas deficiencias nutricionales en comunidades cuya alimentación se basa en el maíz. Asimismo, la nixtamalización favorece la formación de almidón resistente que se comporta como un prebiótico y presenta la capacidad de degradar aflatoxinas, las cuales son toxinas producidas por hongos, lo que aumenta la seguridad alimentaria del maíz nixtamalizado (Fernández Suarez *et al.*, 2013).

Historia de la nixtamalización

El maíz es el principal ingrediente en la

dieta de la población mexicana gracias a su versatilidad para transformarse en una variedad de productos. En la Figura 4 se muestran ejemplos de algunos productos como tortillas, tamales, atoles y tostadas, derivados del maíz. Estos alimentos, en la que la nixtamalización

jugó un papel muy importante, cuentan con gran aceptación en la población mexicana, y particularmente fueron las culturas mesoamericanas, como los aztecas y los mayas, las cuales desarrollaron y perfeccionaron este método a lo largo del tiempo.

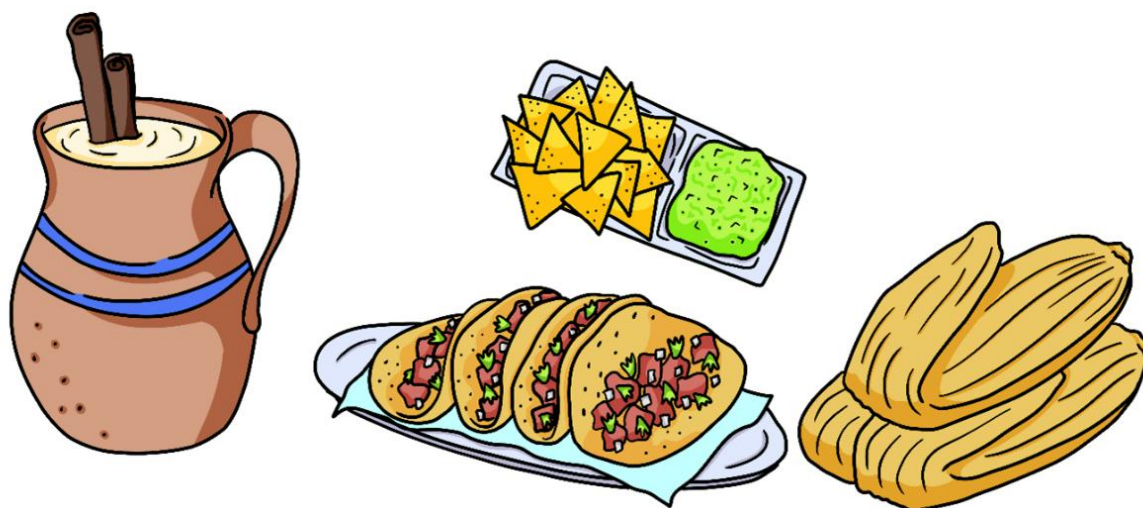


Figura 4: Alimentos elaborados de masa de maíz.

Aunque no se ha podido establecer una fecha precisa para el origen de la práctica de la nixtamalización, la evidencia arqueológica sugiere que los mayas fueron los primeros en llevar a cabo este proceso. Se cree que inicialmente utilizaron el fuego para ablandar los granos de maíz, pero enfrentaron dificultades para retirar la capa externa del grano. Para solucionar este problema, se piensa que recurrieron a las cenizas resultantes del fuego, posiblemente también a cenizas volcánicas, para facilitar la remoción de la cáscara (Vargas, 2014).

Las cenizas fueron la primera fuente de calcio utilizada en el proceso de nixtamalización, dando origen a la "nixtamalización clásica". Con el tiempo los aztecas refinaron el proceso al sustituir las cenizas por cal, que

demonstró ser más eficaz para eliminar la cáscara y mejorar la textura del maíz. La evidencia de este avance se ha encontrado en sitios arqueológicos como Salinas la Blanca, ubicado en la costa del Pacífico sur de Mesoamérica, donde se han hallado restos de tecomates con al menos 3000 años de antigüedad (Fig. 5). Estos hallazgos sugieren que ya en esa época se empleaba el fuego y la cal para remojar el maíz y facilitar su aprovechamiento (Vargas, 2014).

Con el paso del tiempo, el uso de cenizas ha sido mayoritariamente reemplazado por el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), convirtiéndose en el método más empleado en la actualidad, conocido comúnmente como "nixtamalización tradicional".

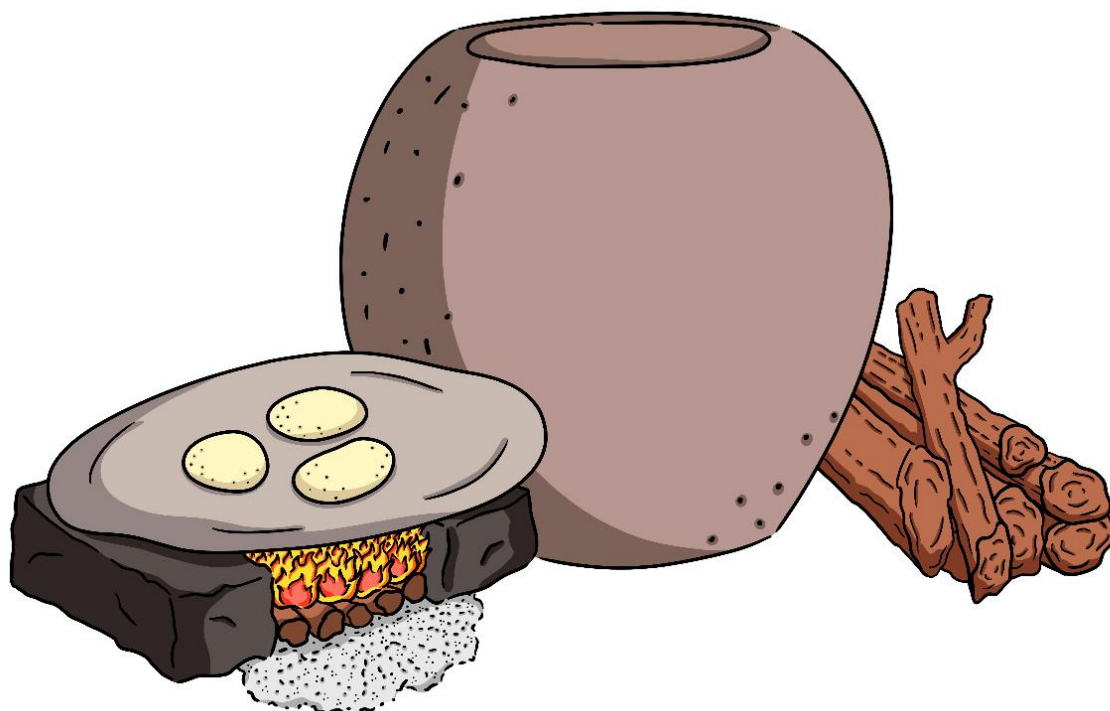


Figura 5: Proceso ancestral de elaboración de tortillas.

Los productos elaborados a partir de maíz nixtamalizado, como tortillas, totopos, tostadas, atole y tostadas, han experimentado un notable crecimiento en popularidad e importancia en Norteamérica, Europa y Asia. Este fenómeno se atribuye a las nuevas tendencias y tecnologías que priorizan la importancia nutricional y el impacto ambiental sobre los intereses económicos de la industria.

Procesos alternativos de nixtamalización

El estudio de la nixtamalización se ha centrado en reducir el consumo de agua y energía, así como en minimizar la producción de nejayote y los tiempos de proceso. Asimismo, se ha buscado aumentar el valor nutricional de los productos mediante el desarrollo de métodos alternativos a la nixtamalización tradicional.

A pesar de la existencia de evidencia

científica que respalda los beneficios de los procesos alternativos de nixtamalización, el sector industrial no ha adoptado plenamente estos nuevos métodos. Esto se debe en gran medida a la demora en la obtención de rendimientos económicos positivos, así como a la falta de aceptación por parte de los consumidores. Entre estos métodos alternos, se incluyen la nixtamalización por extrusión, el calentamiento por microondas, el calentamiento óhmico y la nixtamalización asistida por ultrasonido.

La nixtamalización ecológica, desarrollada y patentada por Figueroa-Cárdenas y colaboradores (2005), no difiere demasiado de la nixtamalización tradicional, ya que el consumo de agua, tiempos de cocción y tiempos de remojo son similares. La diferencia radica en el tipo de alcalinizante utilizado, en la nixtamalización ecológica la fuente de calcio no es el hidróxido de calcio

sino una sal de calcio como los es el sulfato de calcio, carbonato de calcio o cloruro de calcio, los cuales generan nejayote con valores de pH de 4.2 a 7.4, valores considerablemente más bajos en comparación con la nixtamalización con hidróxido de calcio (pH 12 – 14). Este proceso se caracteriza por no retirar completamente el pericarpio de los granos dando como resultado productos con mayor fibra dietética, además de tener una mayor retención de compuestos nutricionales y reduciendo la materia orgánica desechada al ambiente (Escalante-Aburto *et al.*, 2020).

1.6.1. Nixtamalización por extrusión

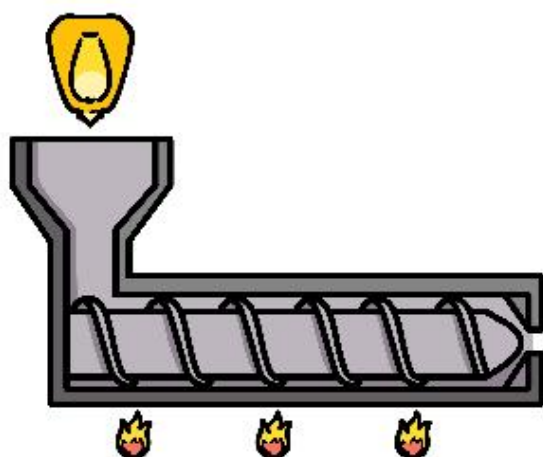


Figura 6: Nixtamalización por extrusión

Se trata de un proceso realizado a altas temperaturas con cortos tiempos de operación. Los granos de maíz primero deben ser molidos para obtener harina, luego esta se mezcla con hidróxido de calcio y agua hasta obtener una humedad del 45%, y se deja reposar por 12 h. A esto se le conoce como harina acondicionada, la cual posteriormente será vertida en la tolva de alimentación del extractor. En este punto la muestra es movida a través del equipo con ayuda de un tornillo sin fin hacia zonas del

cilindro con temperatura ajustable, al final se obtiene un material extruido que vuelve a ser molido para obtener harinas extrusionadas nixtamalizadas. Las ventajas que tiene este método son un consumo mucho menor de agua, menor generación de efluentes contaminantes, disminución de aflatoxinas y tiempo de procesamiento. No obstante, las tortillas elaboradas con este tipo de harinas no son muy aceptadas por los consumidores debido a la rigidez que presentan (Escalante-Aburto *et al.*, 2020).

1.6.2. Nixtamalización por calentamiento infrarrojo

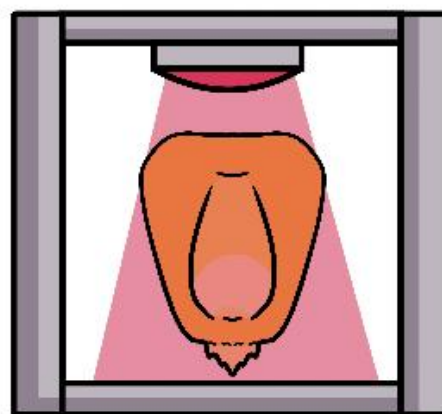


Figura 7: Nixtamalización por calentamiento infrarrojo

Similar a la nixtamalización tradicional, los granos de maíz son cocidos en una relación 1:2 o 1:3 de agua con al menos 1% de hidróxido de calcio a temperaturas y tiempos similares. La diferencia radica en la utilización de un horno donde lámparas de infrarrojo trabajan a 1300 W y una frecuencia de 60 Hz. Después del cocimiento se deja remojar la mezcla por 18 h y posteriormente se desecha el nejayote y se lava el maíz para eliminar el exceso de cal. Entre las ventajas de este método esta un mejor uso de la energía, reducción del tiempo de calentamiento

o mejor conservación de las propiedades nutricionales (Zavala *et al.*, 2016).

1.6.3. Nixtamalización por calentamiento óhmico

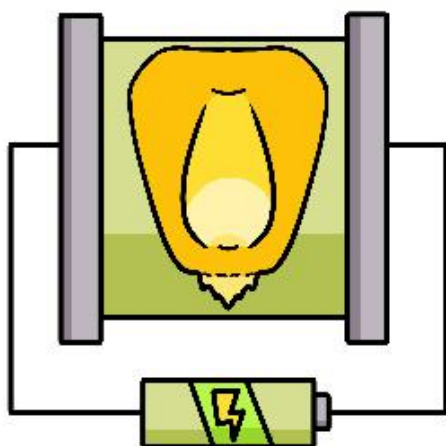


Figura 8: Nixtamalización por calentamiento óhmico

En este tipo de nixtamalización el maíz es molido y tamizado en una maya de al menos 3 mm de grosor, posteriormente se mezcla con 0.3% de hidróxido de calcio y con suficiente agua para alcanzar una humedad del 50%. Luego la mezcla pasa a un horno de calentamiento osmótico, se transporta con ayuda de un tornillo y se inserta en una celda de polycarbonato donde se aplican campos eléctricos moderados con ayuda de electrodos de acero. La mezcla actúa como una resistencia y genera calor, de esta forma se realiza la cocción a 85 °C y se obtienen masas deshidratadas que solo deben ser molidas y tamizadas para usarse en la elaboración de alimentos (Ramírez-Jiménez *et al.*, 2019).

1.6.4. Nixtamalización enzimática



Figura 9: Nixtamalización enzimática.

Para este tipo de nixtamalización, los granos se deben hidratar del 25 al 80 % y someterse a digestión en una solución proteasa alcalina, luego se añade un agente alcalinizante para favorecer la actividad enzimática donde las proteínas del pericarpio son degradadas, esto con el objetivo de suavizar la pared celular y facilitar la molienda. Si se utilizan granos duros se debe hacer un cocimiento previo de al menos 15 min a 90 °C, en cambio, si se utilizan granos blandos la nixtamalización enzimática puede ser aplicada directamente (Escalante-Aburto *et al.*, 2020).

1.6.5. Nixtamalización asistida por ultrasonido

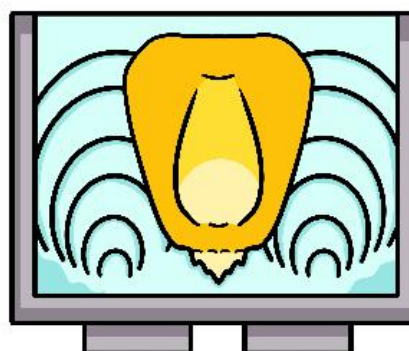


Figura 10: Nixtamalización enzimática.

Este tipo de nixtamalización utiliza condiciones similares de temperatura,

tiempo de cocción, cantidad de alcalinizante o tiempo de remojo a la nixtamalización tradicional, no obstante, su diferencia radica que, durante la cocción, se utiliza un baño sonicator de elevada potencia que genera microburbujas en el medio. Esto permite conservar mejor las estructuras del almidón y reducir los tiempos de cocción ya que las ondas ultrasónicas facilitan la difusión del agua dentro del grano (Escalante-Aburto *et al.*, 2020).

1.6.6. Nixtamalización asistida por microondas

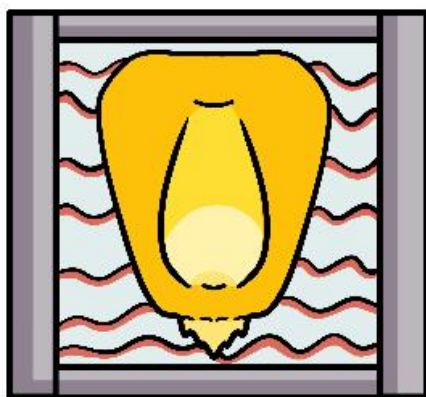


Figura 11: Nixtamalización asistida por microondas.

La nixtamalización por microondas es un método eficiente y rápido para obtener harinas similares a las obtenidas por el método tradicional. Las harinas producidas difieren en el tamaño de partícula, índice de absorción de agua y viscosidad, por ende, las masas y tortillas obtenidas también presentan diferencias. Con este método se requieren menos equipos y espacio, el tiempo de cocción también se reduce consiguiendo así una mayor eficiencia energética (Escalante-Aburto *et al.*, 2020).

Conclusión

La nixtamalización es un proceso

térmico alcalino utilizado como pretratamiento de los cereales, que inició con el maíz en México y que permite producir masas que son la base de una gran variedad de alimentos y que son clave en la alimentación y cultura de México, con beneficios nutricionales y funcionales significativos. Sin embargo, su impacto ambiental plantea desafíos que han impulsado la búsqueda de métodos más sostenibles que a su vez, permitan la obtención de productos de calidad. La investigación y mejora continua de esta técnica son esenciales para optimizar la producción de alimentos a base de maíz y garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

Referencias

- [1] CONABIO. Razas de maíz de México. Biodiversidad Mexicana. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/alimentos/maices/razas-de-maiz>. (2020).
- [2] Escalante-Aburto, A., Mariscal-Moreno, R. M., Santiago-Ramos, D., y Ponce-García, N. An update of different nixtamalization technologies, and its effects on chemical composition and nutritional value of corn tortillas, *Food Reviews International*, 36[5], pp. 456–498, 2020.
- [3] Fernández Suarez, R., Morales Chavez, L. A., y Galvez Mariscal, A., Importance of mexican maize landraces in the national diet: An essential review. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 36, pp. 275–283, 2013.
- [4] Figueroa-Cárdenas, J. D., Rodríguez-Chong, A., y Velés-Medina, J. J. Proceso ecológico de nixtamalización para la producción de harina, masa y tortillas integrales (Centro de investigación y de estudios

- avansados del I.P.N. Patent No. 289339), 2005.
- [5] Lind, D., y Barham, E., The social life of the tortilla: Food, cultural politics, and contested commodification, *Agriculture and Human Values*, 21[1], pp. 47–60, 2004.
- [6] Paredes-López, O., Lara, F. G., y Pérez, L. A. B., La nixtamalización y el valor nutritivo del maíz, *Ciencias* 92, pp. 60–70, 2009.
- [7] Ramírez-Jiménez, A. K., Rangel-Hernández, J., Morales-Sánchez, E., Loarca-Piña, G., y Gaytán-Martínez, M., Changes on the phytochemicals profile of instant corn flours obtained by traditional nixtamalization and ohmic heating process, *Food Chemistry*, 276, pp. 57–62, 2019.
- [8] United States Department of Agriculture. Corn 2024 world production. Foreign Agricultural Service. <https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=0440000>. (2024).
- [9] Vargas, L. A. El maíz, viajero sin equipaje11Trabajo modificado a partir de su presentación en el simposio “Somos de maíz: Principio y destino”, con motivo del vigésimo quinto aniversario de la revista Cuadernos de Nutrición, en el Instituto Nacional de Ciencias Médicas y Nutrición “Salvador Zubirán”, 24 de julio de 2007. *Anales de Antropología*, 48[1], pp. 123–137, 2014.
- [10] Zavala, A., Martínez, H. E., y Vázquez, A., Fate of Aflatoxins from a Novel Procedure for Tortilla Making Based on Infrared Heating, *Philippine Agriculture Scientist*, 99[1], pp- 42-49, 2016.

MATERIALES COMPUESTOS POR ELECTROHILADO PARA SU USO EN INGENIERÍA DE TEJIDOS

Dra. María G. Flores Sánchez

Vicerrectoría de Investigación, Universidad La
Salle México

Dr. Roberto Olayo González

Departamento de Física, Universidad Autónoma
Metropolitana, Iztapalapa

Abstract

This work shows the potential of the electrospinning technique in the generation of composite scaffolds and based on the parameters of this technique and the conditions of the precursor solution used, the result is structures made up of fibers with different diameters and pore sizes, capable of allowing the passage of cells and nutrients within the scaffold, suitable for allowing cell adhesion and proliferation; the characterization of these scaffolds is presented using techniques such as Scanning Electron Microscopy (SEM), Raman Microscopy, and through the analysis and distribution of pores using the ImageJ computer program.

Keywords: Electrospinning, Composite Biomaterials, Tissue Engineering

Resumen

En este trabajo se muestra el potencial que tiene la técnica de Electrohilado en la generación de andamios compuestos y en base a los parámetros de dicha técnica y las condiciones de la solución precursora utilizada, se tiene como resultado estructuras conformadas por fibras con diferentes diámetros y tamaños de poro, capaces de permitir el paso de células y nutrientes dentro del andamio, adecuado para permitir la adhesión y proliferación celular; se presenta la caracterización de estos andamios usando técnicas como Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Microscopía Raman, y mediante el análisis y la distribución de poro haciendo uso de programa de cómputo ImageJ.

Palabras clave: Electrohilado, Biomateriales compuestos, Ingeniería de Tejidos

I. Introducción

Desde hace más de 30 años se ha estudiado la Ingeniería de Tejidos, descrita como la combinación entre células, andamios y factores de crecimiento para dar lugar a nuevos tejidos, de tal manera que se regenere o restaure el tejido u órgano dañado debido a alguna patología o traumatismo, dentro de estos tejidos se encuentran la piel, los huesos, el cartílago, entre otros, los cuales abordados a partir de esta área interdisciplinaria aún siguen teniendo limitantes y retos significativos pero con avances que cada vez se acercan más a alternativas prometedoras dentro del campo.

El electrohilado es una técnica de fabricación basada en el concepto de carga electrostática, en donde una solución generalmente polimérica es inyectada desde un electrodo positivo (inyector) hasta un electrodo negativo (colector) bajo la acción de un campo electromagnético, el cual rompe la tensión superficial que se tiene en la punta del inyector donde se forma el cono de Taylor, dando como resultado micro y nanofibras, (Figura 1). Esta técnica utiliza altos voltajes arriba de 1 KV (Jiyao *et al.*, 2023, Zulkifli *et al.*, 2023).

El principio del electrohilado está determinado por la interacción entre la tensión superficial y la viscosidad de la solución, ésta última debe ser lo suficientemente alta para permitir la formación del jet en el extremo de la aguja y evitar que la solución se disperse en forma de spray, es decir, a concentraciones más altas del polímero, sus cadenas se enredan, lo que evita la ruptura del chorro y permitirá la formación de nano y microfibras, la mayoría de los polímeros utilizados que

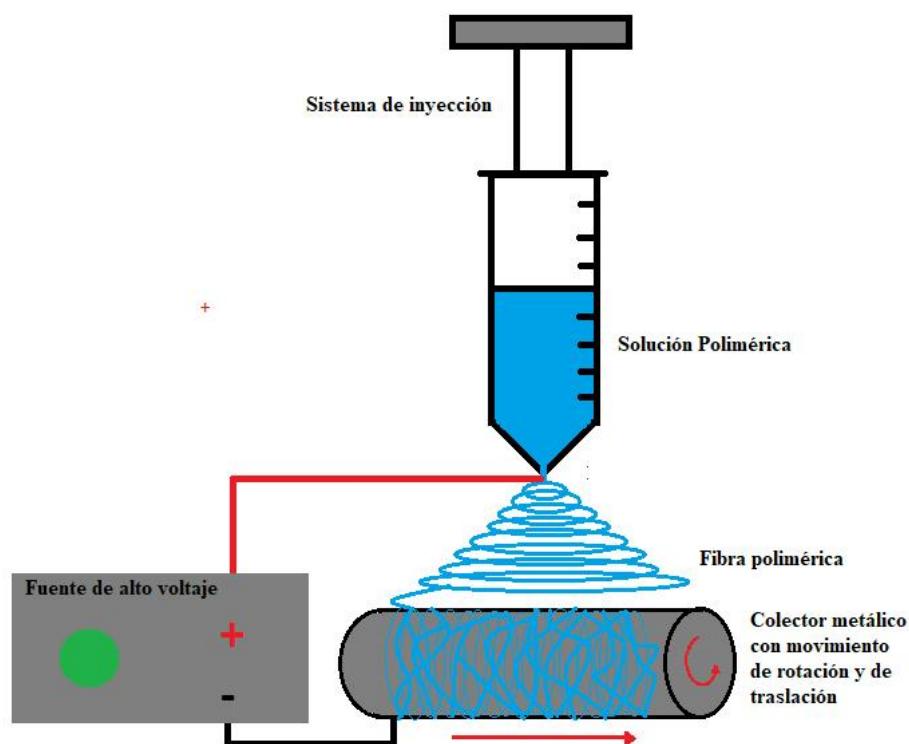


Figura 1: Sistema de electrohilado.

han dado buenos resultados en esta técnica van de los 50000 a los 150000 Da disueltos en soluciones líquidas donde el disolvente es del 10% aproximadamente.

Esta técnica ha ido evolucionando en la fabricación de mallas compuestas de micro y nanofibras utilizadas en medicina regenerativa e Ingeniería de Tejidos, además, es versátil y adaptable según la morfología y las características que se requieren para poder dar soporte, promoviendo adhesión y proliferación a las células que se colocan en estas mallas porosas con alta relación superficie-volumen (Yang C. *et al.*, 2021, Hadi *et al.*, 2020). Por supuesto, los materiales con los que se fabrican los andamios es fundamental para diversas aplicaciones, como la liberación de fármacos, filtración de agua, integración de factores de crecimiento, etc., para lo cual se utilizan principalmente polímeros sintéticos y naturales (Zhong

H., *et al.*, 2022, Shi *et al.*, 2022).

En este trabajo se presenta una descripción de la potencialidad que tiene el utilizar la técnica de electrohilado en diferentes aplicaciones en el campo de la salud y se muestran algunos ejemplos de su uso dentro del grupo de investigación del área de polímeros haciendo especial énfasis en las características de los andamios compuestos de nano y microfibras que promueven la adhesión y proliferación celular y esto radica principalmente en la propuesta de los parámetros, el tipo de solución y polímeros utilizados acorde a la propuesta de solución para reparar algún tejido en específico, haciendo énfasis principalmente en los andamios para tejido epitelial, cardíaco y tejido óseo, caracterizados mediante microscopía electrónica de barrido y un programa computacional de análisis de distribución de fibra y tamaño de poro Image J.

Parámetros que afectan el electrohilado

Los principales parámetros que afectan el electrohilado son la solución precursora y el proceso de electrohilado:

En la solución precursora es importante considerar el peso molecular del polímero utilizado, así como su naturaleza y su arquitectura, es decir si es ramificada, lineal, etc.; también intervienen los efectos dieléctricos del solvente bajo los parámetros establecidos en la solución como la volatilidad del solvente, la tasa de evaporación, la reología; finalmente, se deben considerar las propiedades de la solución como la viscosidad, la conductividad y la tensión superficial.

Dentro de los parámetros del proceso de electrohilado se encuentran la velocidad de inyección, el diámetro de la aguja, la distancia entre los electrodos, la intensidad del voltaje, la temperatura, la atmósfera ambiental y la humedad, además, la forma y movimiento del colector.

El resultado del entremallado, tamaño de fibras y poro, es afectado por los parámetros anteriores, lo cual a su vez influye en las propiedades del biomaterial para ciertas aplicaciones en la Ingeniería de Tejidos.

Materiales utilizados en el electrohilado

La versatilidad del electrohilado hace posible la fabricación de biomateriales a base de polímeros, cerámicas, metales y compuestos. En este artículo hablaremos del proceso de biomateriales compuestos de polímero y cerámica mediante electrohilado.

Entre los polímeros que han dado buenos resultados al electrohilarse

se encuentran aquellos que son biodegradables como el poliácido láctico (Figura 2), (Flores *et al.*, 2018), el poliácido glicólico, la policaprolactona, y polímeros sintéticos, como el polietileno de vinilo, el poliuretano, el óxido de polietileno y el polivinil alcohol. También se han electrohilado polímeros naturales, como el colágeno, la gelatina, el quitosano, la proteína de seda, el ácido hialurónico, el fibrinógeno y la elastina. Se han utilizado ampliamente mezclas de polímeros para combinar las propiedades de los diferentes componentes; por ejemplo, algunas veces se utilizan mezclas de polímeros naturales y sintéticos para proporcionar fibras con una buena respuesta celular y buenas propiedades mecánicas (Zahra *et al.*, 2023, Mohammad Hossein, 2022).

La combinación de diferentes tipos de materiales es un enfoque prometedor para la producción de materiales electrohilados biomiméticos con actividades funcionales. Un ejemplo típico de un compuesto electrohilado es una matriz polimérica que contiene nanopartículas de hidroxiapatita que tienen como objetivo aumentar la respuesta celular en la regeneración del tejido óseo (Figura 3). El diámetro de la fibra se ve afectado por muchos parámetros, pero se controla principalmente variando el voltaje y la concentración de la solución de polímero, la distancia entre los electrodos y el diámetro de la jeringa en el sistema de inyección (Flores *et al.*, 2028).

La estructura interna de los entremallados o la disposición de las fibras se puede modificar haciendo uso de diferentes electrodos de recolección; según su aplicación, se ha encontrado que los electrodos fijos dan como resultado fibras dispuestas de forma aleatoria, mientras que si se tiene

electrodo giratorio las fibras resultan en un acomodo más lineal, y si se usan más de una aguja en el sistema de inyección, lo que se conoce como sistema de inyección coaxial, entonces se pueden combinar diferentes biomateriales dando estructuras compuestas incluso entre materiales que sí se pueden electrohilar y aquellos que no, lo que

en la estructura resultante favorece el soporte ya que mejora sus propiedades mecánicas e incluso la introducción de nutrientes a la malla, lo cual es favorecedor cuando se depositan células en éstas y cuando los materiales utilizados son biocompatibles.

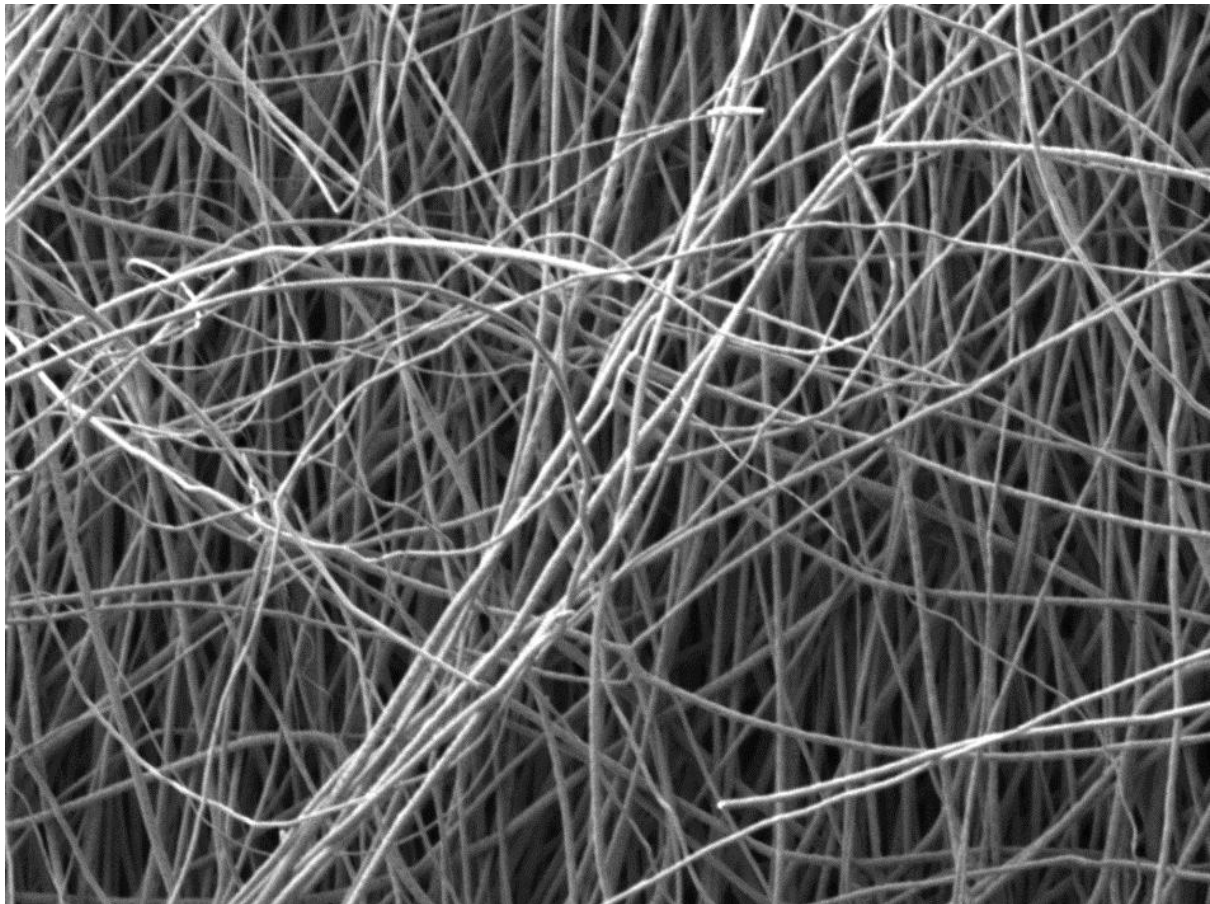


Figura 2: Fibras de electrohilado de Ácido Poliláctico (Flores *et al.*, 2018).

Aplicación de biomateriales fabricados con electrohilado

Un biomaterial es aquel que tiene propiedades para poder interactuar con los tejidos vivos, en la Ingeniería de Tejidos los biomateriales fabricados con electrohilado han sido útiles debido a las nano y microfibras que tienen en su estructura y que imitan a las fibras que conforman a los tejidos y órganos, además de que cuentan con

una relación superficie-volumen alta; dentro de sus aplicaciones en el área de la salud se encuentra su uso en la liberación controlada de fármacos, suturas, implantes para cicatrización de heridas o quemaduras, principalmente (Zahra *et al.*, 2023, Mohammad *et al.*, 2023).

El uso de electrohilado en Ingeniería de tejidos tiene la ventaja de proveer las

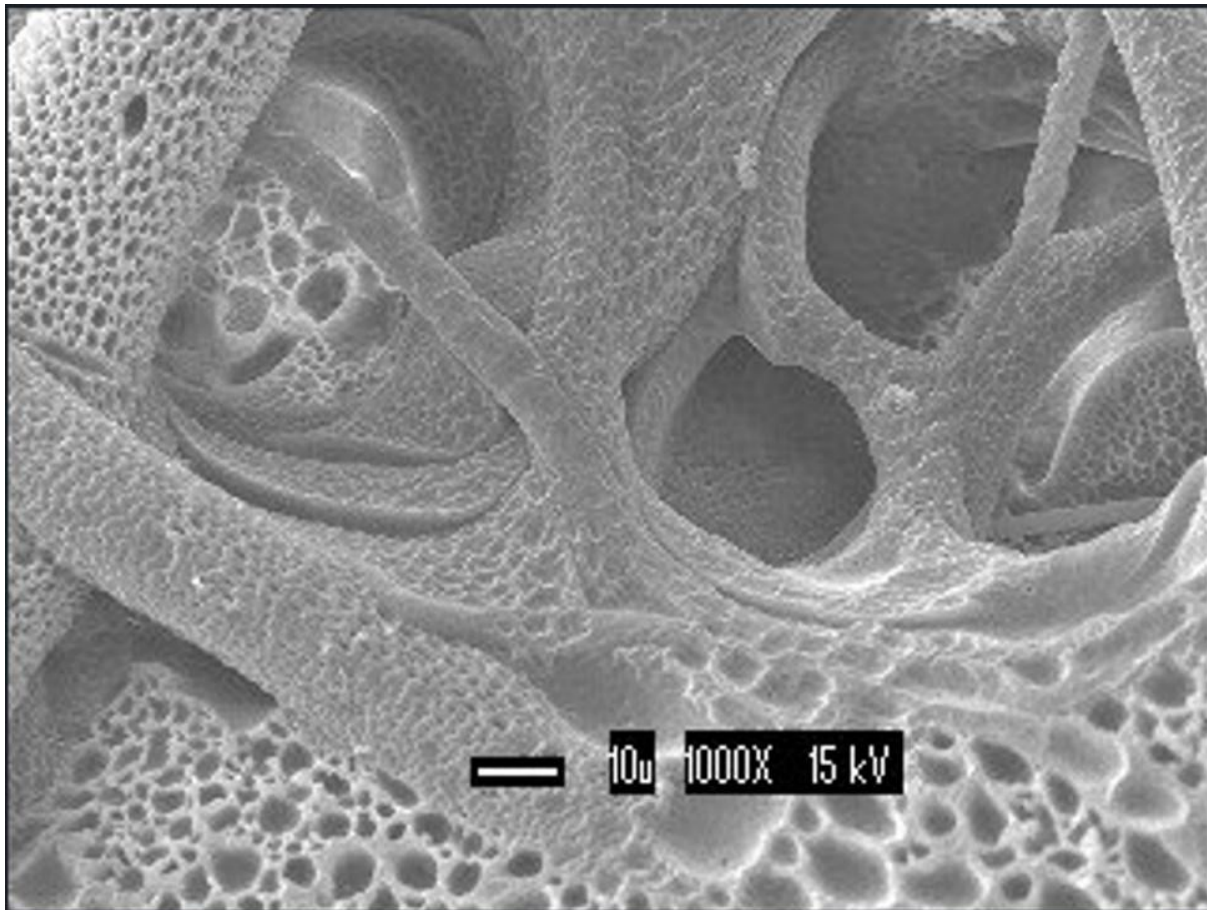


Figura 3: Fibras de electrohilado de Ácido Poliláctico/Hidroxiapatita (Flores *et al.*, 2018).

condiciones necesarias a los andamios de tal manera que sean capaces de generar adhesión y proliferación celular, además, dependiendo del caso, se pueden modificar las propiedades de activación de la superficie y capacidades mecánicas, en el tejido óseo por ejemplo, tener un andamio biocompatible, bioactivo y mecánicamente adecuado es imprescindible para que las células óseas puedan adherirse y proliferar e imitar la matriz extracelular del tejido a reparar o regenerar, de tal manera que cuando esto sucede, los biomateriales se biodegradan a una tasa particular la cual depende de su naturaleza.

Electrohilado en Ingeniería de tejido epitelial

En la reparación de heridas por quemaduras o debido a patologías como la diabetes donde el daño al tejido puede

ser leve o severo, se ha utilizado el electrohilado y distintos biomateriales para regenerar el tejido debido a su capacidad de adhesión y migración de células y nutrientes en el interior de la estructura que imita las fibras de colágeno del tejido nativo, en este tipo de aplicaciones, la orientación de las fibras es importante ya que de ello depende la aceleración con la que se repara el tejido; se ha visto que andamios construidos con fibras alineadas en conjunto con capas distribuidas aleatoriamente, son viables y dieron buenos resultados en la proliferación de fibroblastos y queratinocitos, usando como base de la solución polimérica Policaprolactona y Quitosano en heridas en modelo animal de rata (Sun L. *et al.*, 2018, Pal P. *et al.*, 2017). Para heridas relacionadas con diabetes, se han utilizado andamios construidos por

fibras alineadas en forma vertical y en forma radial haciendo uso de células troncales mesenquimales extraídas a partir de médula ósea, donde se observó que bajo presión, las células recuperan su forma, lo que es de gran utilidad en heridas por diabetes tipo 2, además de que promueve la formación de colágeno e inhiben la formación de moléculas proinflamatorias (Chen S. *et al.*, 2020) e infecciones (Villarreal-Gómez *et al.*, 2021), además de que al combinar esta técnica con componentes bioactivos, se imitan las características estructurales y biológicas de la matriz extracelular para promover la regeneración completa del tejido cutáneo lesionado.

Electrohilado en Ingeniería de tejido cartilaginoso

El electrohilado para reparación de cartílago ha sido ampliamente estudiado debido al confort que promueve en las personas que tienen alguna afectación por patología o simplemente por el desgaste debido a la edad y a la actividad a lo largo del tiempo; se han hecho varias propuestas donde el enfoque principal radica en estudiar la presión máxima que puede soportar el tejido esto debido a que existen diferentes tipos de cartílago y donde es de suma importancia la construcción biológica ya que uno de los tipos carece de vasos sanguíneos donde el reto es aún mayor y se deben considerar además las zonas de la estructura, es decir, aquellas donde se tiene la transición entre el hueso y el músculo, de tal manera que los polímeros, células y factores de crecimiento que se utilicen harán la diferencia dentro de la aplicación específica (Chung C. *et al.*, 2008, Irawan V. *et al.*, 2018). El polímero más utilizado para cartílago en Ingeniería de Tejidos es la policaprolactona usando células madre mesenquimales humanas (Wise J. *et al.*, 2009), y otro añadiendo factor de

crecimiento transformante, promoviendo la estimulación de la condrogénesis in vitro (Yan B. *et al.*, 2022).

Electrohilado en Ingeniería de tejido cardíaco

Durante varias décadas, la ingeniería de tejidos ha evolucionado para inducir la creación de tejido cardíaco funcional. Los nanomateriales electrohilados son buenos como andamios conductores y adecuados para las células del corazón y los vasos sanguíneos. Ha habido una amplia investigación sobre injertos vasculares, válvulas cardíacas artificiales e ingeniería de tejidos miocárdicos en particular en los últimos años.

Aunque el estándar de oro para el reemplazo vascular sigue siendo el autoinjerto, éste se encuentra limitado por la escasez de donantes y la lesión del sitio secundario, además de los costos que ello implica. Hoy en día sigue siendo un reto a nivel mundial el desarrollar nuevos injertos de diámetro pequeño con endotelización rápida y sin complicaciones en trombosis para lo que diversas investigaciones están centradas en biomateriales electrohilados, por ejemplo, se utilizó electrohilado simple para llenar nanofibras con ácido salvanólico B y heparina extraída de Salvia, lo que mostró la prevención eficaz prevenir eficaz de trombosis aguda y promovió la endotelización rápida de los vasos sanguíneos. Jiayin *et al.* hilaron electrostáticamente diferentes espesores de PCL sobre sebacato de poliglicerol poroso (PGS) y descubrieron que las fibras de PCL más gruesas y más porosas contaban con mayor capacidad de promover la angiogénesis además de que mostraron mejores propiedades mecánicas que los grupos con menor diámetro. También se ha usado la técnica de electrohilado coaxial para

crear una combinación de ECM natural y polímeros sintéticos degradables, y luego los utilizaron como injertos vasculares para experimentos con animales. Los injertos mostraron una liberación sostenida de ácido hialurónico y promovieron la regeneración del músculo vascular liso. Por lo que los injertos vasculares biomiméticos que utilizan nanofibras electrohiladas tienen potencial un en la reparación y regeneración vascular (Yan, B *et al.*, 2022).

Electrohilado en Ingeniería de tejido óseo

La Ingeniería de Tejido óseo es un campo interdisciplinario en el cual se utilizan células, factores de crecimiento y andamios o soportes celulares para regenerar al hueso. Los biomateriales deben ser cuidadosamente seleccionados considerando biocompatibilidad, propiedades físico-químicas, tasa de biodegradación, bioactivación, y que promuevan la diferenciación osteogénica, etc., las cuales confieren un ambiente adecuado para las células que se siembran en éstos, dentro de los más utilizados se encuentran aquellos compuestos por polímeros y cerámicas, y que además, son susceptibles de ser utilizados para fabricar andamios entremallados mediante el electrohilado.

En este trabajo, se muestra que para la Ingeniería de Tejido Óseo, los materiales que han dado mejores resultados son compuestos por Hidroxiapatita (HA) y Ácido Poliláctico (PLA); siendo el Ácido Poliláctico un polímero biodegradable y biocompatible que ha sido utilizado en la clínica de ortopedia para la construcción de placas y tornillos, además es de fácil acceso y de bajo costo; mientras que la Hidroxiapatita es el componente principal del tejido óseo y al que se atribuye la rigidez que éste posee, es un

material osteoinductivo que promueve la adhesión y proliferación de osteoblastos (Flores *et al.*, 2018).

Preparación de la solución precursora compuesta de PLA/HA

Para electrohilar la solución precursora, fue importante establecer las cantidades de soluto y solvente buscando obtener una solución conductora y con una viscosidad tal que el campo eléctrico aplicado pueda estirla sin romperla desde el electrodo positivo hasta el electrodo negativo; para generar una propuesta de solución de PLA e HA, se encontró una mezcla en proporción de 10 mL de disolvente, 90% cloroformo (9 mL) y 10% etanol (1 mL); en cuanto al soluto, se realizaron pruebas añadiendo a la solución PLA/HA; para éste proceso fue necesario añadir el PLA mediante agitación suave por 5 horas a temperatura ambiente y después añadir la HA e inmediatamente llevar al sistema de Electrohilado. También se adiciona etanol a la solución ya que ayuda a mejorar la homogenización del hilado haciendo que la morfología de las fibras varíe simultáneamente y aumentan la polaridad de la solución y permiten que el solvente se evapore más rápido mientras que las fibras se van depositando en el electrodo negativo o sustrato de recolección. Debido a que es de gran interés conocer la concentración de HA presente en las matrices, se calcularon dichas concentraciones de HA para algunas de las soluciones empleadas con el propósito de hacer comparaciones entre las muestras, lo que finalmente representó un porcentaje de HA del 18.1 % y 35.7 % fue el máximo para ese experimento, porcentaje que es significativo si se considera que la parte inorgánica del hueso es del 60% la cual provee soporte mecánico para el movimiento, da protección a órganos vitales y regula la homeostasis mineral.

Condiciones del sistema de electrohilado

En el electrohilado normalmente las soluciones se preparan a temperatura ambiente. Se utilizan voltajes altos entre 10KV a 30KV, a las soluciones poliméricas de alta densidad molecular descritas en el punto anterior, desde una aguja inyectora hacia una superficie metálica colectora en donde se solidifica formando micro y nanofibras con diámetros alrededor de 50 nanómetros y hasta algunas micras, y de longitudes variables. Los materiales que se utilizan en esta técnica son principalmente polímeros porque estos tienen las propiedades físicas y químicas para

formar fibras que sean resistentes, que confieran cierta elasticidad y que sean duraderas. Se le denomina co-electrohilado cuando la solución precursora está formada por un polímero con partículas inmersas en él (Figura 4).

Morfología de las fibras de PLA mediante SEM y RAMAN

La espectroscopía Raman, es una técnica de dispersión de luz no destructivas que permiten estudiar diversos tipos de entremallados o biomateriales compuestos, lo cual es de gran utilidad ya que permite distinguir la distribución dentro del scaffold de cada material contenido en éste, (Figura 4).

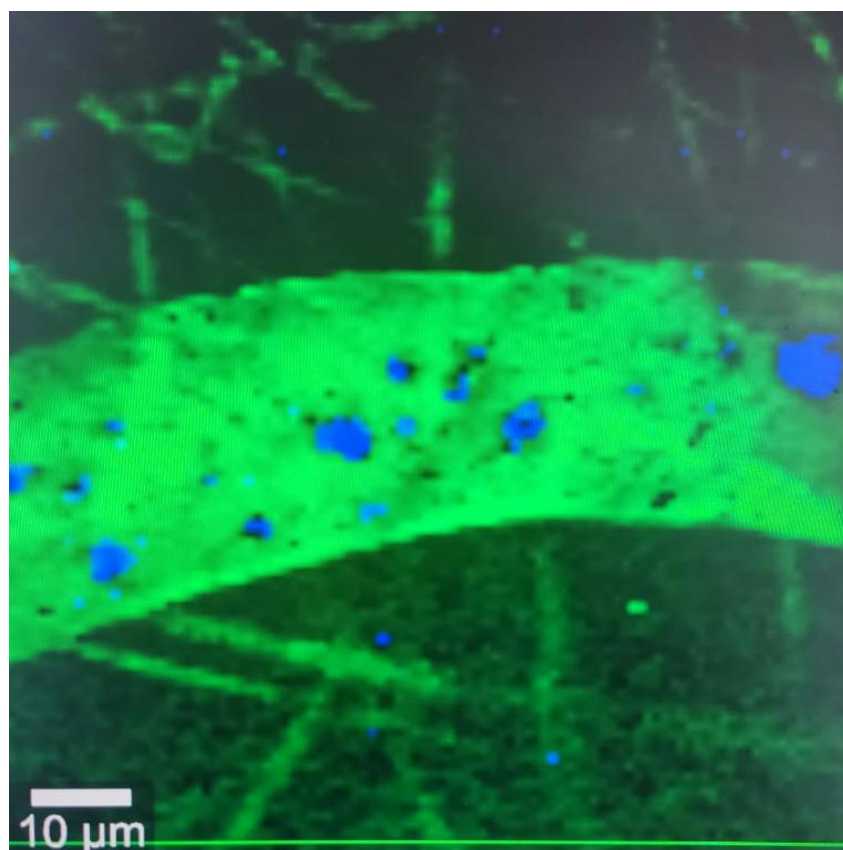


Figura 4: Microscopía RAMAN de fibras electrohiladas de PLA(verde) con PVA (azul), distribuidas de manera aleatoria y que efectivamente confirman la presencia de ambos polímeros que fueron previamente cargados en la solución en el sistema de inyección, además de que se observan poros de diferentes tamaños y diámetro de fibras también con diferencias significativas, predominando en este caso las de PLA.

Análisis de la distribución de las fibras mediante IMAGEJ

Image J es un programa de cómputo que se utiliza para hacer el análisis de la distribución de fibras, el diámetro de éstas y el tamaño de poro dentro de un andamio, esto es de gran utilidad ya que

con ello se puede estimar el paso celular a través de las mallas, debido a que en promedio del diámetro de una célula es de 10 micras, además de que también se cuenta con el paso de nutrientes necesarios para que las células puedan sobrevivir (Figura 5)

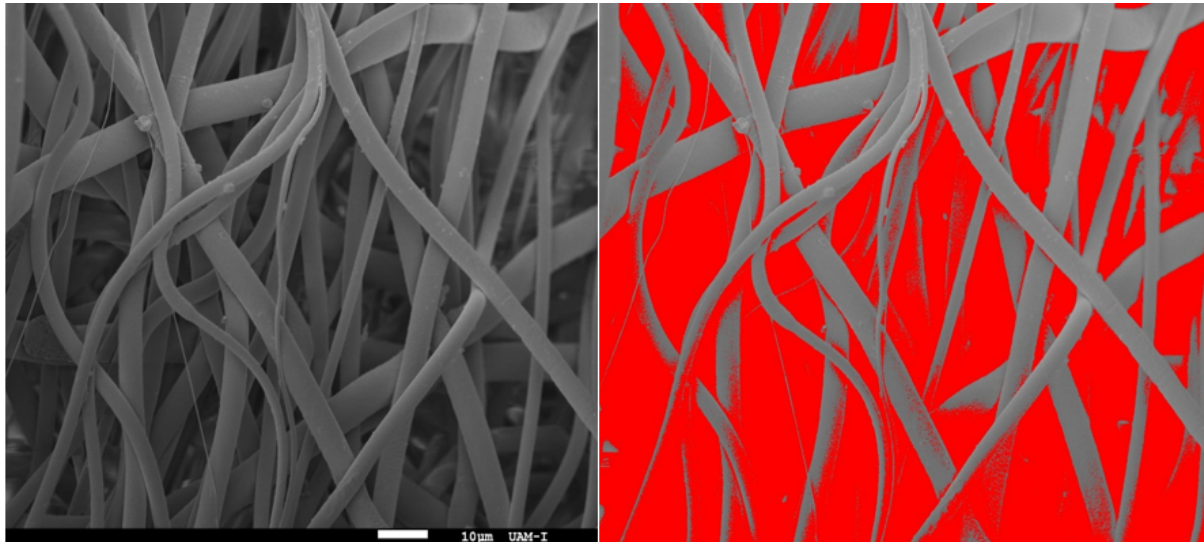


Figura 5: Fibras de electrohilado de Ácido Poliláctico distribuidas aleatoriamente, el análisis se realizó mediante el programa de cómputo Image J, en base a imágenes obtenidas mediante Microscopía Electrónica de Barrido el área roja nos permite evaluar la porosidad aparente y ver si el andamio es adecuado para ingeniería de tejidos.

Conclusiones

La técnica de Electrohilado sigue siendo una herramienta útil en la construcción de andamios compuestos de uno o más materiales, la cual provee de una estructura porosa suficiente para que las células puedan permear dentro del material y favorecer así a la adhesión, proliferación celular y construcción de la matriz extracelular. Es importante destacar que dependiendo del polímero y la cerámica que se utilicen, es la concentración que se tiene que establecer para que el sistema de electrohilado pueda hacer el estiramiento y deposición de manera correcta en el sustrato de recolección, por lo que hallar las condiciones del sistema tales como el voltaje utilizado,

la distancia entre emisor y colector, la velocidad de inyección, el diámetro de la aguja de inyección, la temperatura a la que se inyecta, y por supuesto la solución precursora son fundamentales para lograr un entremallado con fibras nano y micrométricas y tamaño de poro adecuado para el nicho celular. Las diferentes técnicas de caracterización son útiles para confirmar un electrohilado exitoso según la aplicación objetivo, destacando para este caso que los materiales utilizados se conservan en los entremallados, se tiene el tamaño de poro adecuado para la transferencia de nutrientes y células a través de éstos, diversidad de diámetros los cuales a su vez confieren soporte, adherencia celular y capacidad

de proliferación celular.

Referencias

- [1] Jiyao Xing, Miao Zhang, Xinlin Liu, Chao Wang, Nannan Xu, Dongming Xing, Multi-material electrospinning: from methods to biomedical applications, *Materials Today Bio*, Volume 21, 2023, 100710, ISSN 2590-0064, <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100710>.
- [2] Zulkifli, M.Z.A.; Nordin, D.; Shaari, N.; Kamarudin, S.K. Overview of Electrospinning for Tissue Engineering Applications. *Polymers* 2023, 15, 2418. <https://doi.org/10.3390/polym15112418>.
- [3] Yang, C.; Shao, Q.; Han, Y.; Liu, Q.; He, L.; Sun, Q.; Ruan, S. Fibers by Electrospinning and Their Emerging Applications in Bone Tissue Engineering. *Appl. Sci.* 2021, 11, 9082. <https://doi.org/10.3390/app11199082>.
- [4] Hadi Saniei, Sayedali Mousavi, Surface modification of PLA 3D-printed implants by electrospinning with enhanced bioactivity and cell affinity, *Polymer*, Volume 196, 2020, 122467, ISSN 0032-3861, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122467>.
- [5] Zhong H, Huang J, Wu J, *et al.* Electrospinning nanofibers to 1D, 2D, and 3D scaffolds and their biomedical applications. *Nano Research*, 2022, 15(2): 787-804. <https://doi.org/10.1007/s12274-021-3593-7>
- [6] Shi, Shuo & Si, Yifan & Han, Yanting & Iqbal, Mohammad Irfan & Fei, Bin & Li, Robert & Hu, Jinlian & Qu, Jinping. (2022). Recent Progress in Protective Membranes Fabricated Via Electrospinning: Advanced Materials, Biomimetic Structures, and Functional Applications. *Advanced Materials*. 34. 2107938. [10.1002/adma.202107938](https://doi.org/10.1002/adma.202107938).
- [7] Flores-Sánchez María G., Atlántida M. Raya-Rivera, Diego R. Esquiliano-Rendon, Patricia G. Ontiveros-Nevares, Nancy C. Islas-Arteaga, Juan Morales-Corona & Roberto Olayo (2018) Scaffolds of polylactic acid/hydroxyapatite coated by plasma with polypyrrole-iodine for the generation of neo-tissue–bone in vivo: Study in rabbit, *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 67:7, 427-437, DOI: 10.1080/00914037.2017.1342249.
- [8] Zahra Khalilimofrad, Hadi Baharifar, Azadeh Asefnejad, Kamyar Khoshnevisan, Collagen type I cross-linked to gelatin/chitosan electrospun mats: Application for skin tissue engineering, *Materials Today Communications*, Volume 35, 2023, 105889, ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105889>.
- [9] Mohammad Hossein Mirmusavi, Mehdi Ahmadian, Saeed Karbasi, Polycaprolactone-chitosan/multi-walled carbon nanotube: A highly strengthened electrospun nanocomposite scaffold for cartilage tissue engineering, *International Journal of Biological Macromolecules*, Volume 209, Part B, 2022, Pages 1801-1814, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.152>.
- [10] Sun L, Gao W, Fu X, Shi M, Xie W, Zhang W, Zhao F, Chen X (2018) Enhanced wound healing in diabetic rats by nanofibrous scaffolds mimicking the Basketweave

- pattern of collagen fibrils in native skin. *Biomater Sci* 6:340–349. <https://doi.org/10.1039/c7bm00545h>.
- [11] Pal P, Srivas PK, Dadhich P, Das B, Maulik D, Dhara S (2017) Nano- /microfibrous cotton-wool-like 3D scaffold with core-shell architecture by emulsion electrospinning for skin tissue regeneration. *ACS Biomater Sci Eng* 3:3563–3575. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.7b00681>
- [12] Chen S, Wang H, Su Y, John JV, McCarthy A, Wong SL, Xie J (2020) Mesenchymal stem cell-laden, personalized 3D scaffolds with controlled structure and fiber alignment promote diabetic wound healing. *Acta Biomater* 108:153–167. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.03.035>
- [13] Villarreal-Gómez, L.J.; Pérez-González, G.L.; Bogdanchikova, N.; Pestryakov, A.; Nimaev, V.; Soloveva, A.; Cornejo-Bravo, J.M.; Toledano-Magaña, Y. Antimicrobial Effect of Electrospun Nanofibers Loaded with Silver Nanoparticles: Influence of Ag Incorporation Method. *J. Nanomater.* 2021, 2021, 9920755.
- [14] Chung C. and Burdick J. A., Engineering cartilage tissue, *Advanced Drug Delivery Reviews.* (2008) 60, no. 2, 243–262, <https://doi.org/10.1016/j.addr.2007.08.027>, 2-s2.0-36849028030, 17976858.
- [15] Irawan V., Sung T. C., Higuchi A., and Ikoma T., Collagen scaffolds in cartilage tissue engineering and relevant approaches for future development, *Tissue engineering and regenerative medicine.* (2018) 15, no. 6, 673–697, <https://doi.org/10.1007/s13770-018-0135-9>, 2-s2.0-85057026834, 30603588.
- [16] Wise J. K., Yarin A. L., Megaridis C. M., and Cho M., Chondrogenic differentiation of human mesenchymal stem cells on oriented nanofibrous scaffolds: engineering the superficial zone of articular cartilage, *Tissue Engineering Part A.* (2009) 15, no. 4, 913–921, <https://doi.org/10.1089/ten.tea.2008.0109>, 2-s2.067049167743, 18767972.
- [17] Yan, B., Zhang, Y., Li, Z. *et al.* Electrospun nanofibrous membrane for biomedical application. *SN Appl. Sci.* 4, 172 (2022). <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05056-2>.



ESTRATEGIAS EDUCATIVAS PARA DETECTAR INGENIERÍA SOCIAL POTENCIADA POR CHATBOTS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Dr. David Filio Aguilar

Dr. Daniel Guerrero Castillo

Maestría en Ciberseguridad y Ciberdefensa de la
Escuela Militar de Ingeniería, Universidad del
Ejército y Fuerza Aérea Mexicanos

Abstract

The use of Artificial Intelligence (AI) chatbots as tools for social engineering attacks has become a new threat in the field of cybersecurity. The problem is increasing in education, as students and teachers can be vulnerable targets for automated manipulation techniques. This article presents a synthesis of the state of the art on the close relationship between generative AI and social engineering techniques and proposes educational strategies to avoid manipulation and possible deception attempts. In addition, it highlights the need to incorporate these topics in educational programs in engineering and other disciplines as a support to strengthen digital literacy and prepare future professionals to face social engineering challenges developed by AI.

Keywords: Artificial intelligence Chatbots, Educational strategies, Social engineering, Phishing.

Resumen

El empleo de chatbots de Inteligencia Artificial (IA) como herramientas para realizar ataques de ingeniería social se ha convertido en una nueva amenaza en el ámbito de la ciberseguridad. El problema se incrementa en el área de la educación, ya que los estudiantes y docentes pueden ser blancos vulnerables frente a técnicas de manipulación automatizada. En este artículo se presenta una síntesis del estado del arte sobre la estrecha relación entre la IA generativa y las técnicas de ingeniería social y propone estrategias educativas para evitar manipulación y posibles intentos de engaño. Además, se destaca la necesidad de incorporar estos temas en los programas educativos de ingeniería y otras disciplinas como apoyo para fortalecer la alfabetización digital y preparar a los futuros profesionistas

para enfrentar desafíos de ingeniería social desarrollada por IA.

Palabras clave: Chatbots de Inteligencia Artificial, Estrategias educativas, Ingeniería social, Phishing.

Introducción

El uso de la ingeniería social ha sido uno de los vectores de ataque más eficaces en el ámbito de la ciberseguridad. Consiste en manipular a las personas para que revelen información confidencial o realicen acciones que pongan en peligro la seguridad de los sistemas informáticos (Birthriya, 2025). Los ataques de ingeniería social son una amenaza creciente, ya que explotan vulnerabilidades humanas en lugar de fallos técnicos (González-Hugo, 2025). En general es más fácil engañar a una persona para que realice alguna acción concreta (como colocar sus credenciales de inicio de sesión en una página falsa) que lograr el mismo objetivo por otros medios.

Con la aparición de los chatbots de Inteligencia Artificial (IA), la ingeniería social ha alcanzado un nivel sofisticado y demostrado un gran potencial para la automatización, modelos de lenguaje extenso (LLM, por sus siglas en inglés) como *Bard*, *ChatGPT*, o *Claude* pueden ser utilizados para simular interacciones humanas convincentes (Olague, 2025), lo que sin duda incrementa el alcance y efectividad de ataques personalizados, con el apoyo de estos modelos es posible automatizar partes o incluso el ciclo de vida completo de un ataque de ingeniería social (Reed, 2024). En teoría estos modelos de ingeniería social completamente entrenados pueden aprender de cada ataque y mejorar poco a poco su tasa de éxito (Schmitt, 2024).

Una técnica de ingeniería social es

el *phishing* que busca engañar a las personas para que revelen información confidencial, haciéndose pasar por fuentes confiables mediante correos electrónicos, mensajes de texto o sitios web falsos con la intención de robar información confidencial, como datos de identificación personal, credenciales de inicio de sesión o números de tarjetas de crédito (Li, 2024). Datos recientes demuestran un preocupante incremento en los ataques de *phishing* impulsados por IA, según el informe de Zscaler ThreatLabz estos ataques crecieron en un 47.2%, destacándose el uso de técnicas basadas en IA para generar mensajes más persuasivos y convincentes (Bardají, 2025).

Cada que sale un nuevo modelo de lenguaje LLM los actores mal intencionados prueban inmediatamente el potencial para su uso de manera indebida, incluso han desarrollado versiones maliciosas como: GhostGPT, WormGPT y FraudGPT, diseñadas para evadir controles éticos. Así como evolucionan los modelos de IA convencionales, también lo hacen sus contrapartes oscuras y se comercializan activamente como herramientas de *hacking*, por ejemplo, la herramienta: HackerGPT Lite, que fue diseñada con un enfoque ético, pero su uso indebido podría generar phishing y distribución de malware (Check Point, 2025).

En el área educativa, donde la alfabetización digital no incluye la identificación de amenazas basadas en IA, se abre una brecha crítica en la preparación de los futuros profesionistas en las diferentes áreas del conocimiento. Este escenario plantea la necesidad de desarrollar estrategias pedagógicas de enseñanza-aprendizaje específicas para reconocer indicios lingüísticos y conductuales de ingeniería social

potenciada por IA.

Materiales y métodos

Se realizó una revisión documental de artículos técnicos y científicos publicados entre los años 2022 y 2025, con el fin de seleccionar los estudios relevantes sobre el uso malicioso de chatbots y su papel en ataques de ingeniería social, con énfasis en documentos que analizan la respuesta del sector educativo. Además, se consultaron informes de instituciones y organismos del ámbito de la ciberseguridad como: el Centro Nacional de Respuesta a Incidentes Cibernéticos (CERT-MX, 2023), las empresas líderes en ciberseguridad (Check Point, 2025) y ESED-Ciberseguridad y soluciones de TI (Bardají, 2025), la Agencia de la Unión Europea para la Ciberseguridad (ENISA, 2024) y la Agencia de Seguridad Cibernética y de Infraestructura (CISA, 2025), para identificar tendencias y recomendaciones recientes. Después del análisis documental, se propone un conjunto de estrategias educativas basadas en el análisis de casos, técnicas de detección y prevención, dirigidas a estudiantes de ingeniería y otras disciplinas.

Resultados

Los hallazgos de la revisión demuestran que:

- Los chatbots generativos tienen la capacidad de crear conversaciones altamente creíbles que incluyen empatía simulada, lenguaje adaptativo y persistencia en la conversación (Falade, 2023).
- Se han descubierto ataques de phishing conversacional potenciados por IA en redes sociales, servicios de soporte técnico falsos y simulaciones de asistencia académica (Schmitt, 2024).
- Los patrones identificados en estos

ataques incluyen: tono emocional artificial, respuestas muy rápidas o perfectas, insistencia en obtener datos personales y un lenguaje neutro sin errores contextuales (Check Point, 2025).

Con base en lo anterior, se proponen las siguientes estrategias educativas:

1. **Simulaciones inversas:** realizar prácticas donde los estudiantes entrenen chatbots con fines educativos que simulen intentos de manipulación, para comprender como su lógica de funcionamiento.
2. **Taller de detección de perfiles falsos asistidos por IA:** organizar talleres para que los estudiantes analicen perfiles de redes sociales que simulan identidades humanas mediante imágenes generadas por IA y publicaciones automatizadas. Para identificar señales inconsistentes como en fechas, interacción genuina o imágenes de perfil generadas con herramientas como: ThisPerson DoesNotExist.
3. **Chatbots éticos en redes estudiantiles:** motivar a los estudiantes a diseñar prototipos de chatbots éticos que actúen como filtros para evitar la manipulación y advertir sobre posibles intentos de engaño y/o manipulación, además, esta estrategia promueve el desarrollo de IA con un enfoque ético.
4. **Concientización crítica:** impulsar a los estudiantes a la reflexión y al pensamiento crítico sobre los límites del uso de la IA en las interacciones humanas y los riesgos que representa para la sociedad.

5. **Fomentar la comprobación directa:** promover en la comunidad estudiantil que antes de compartir información sensible o ejecutar algún tipo de operación en medios digitales, se debe validar la autenticidad de la solicitud mediante una comprobación directa con la fuente emisora, ocupando únicamente medios oficiales previamente verificados.

Discusión

El uso de chatbots en la ingeniería social representa una disrupción tecnológica que exige una respuesta rápida y eficaz desde el ámbito educativo. Aunque el uso de la IA proporciona beneficios en términos de productividad y automatización, el uso indebido como herramienta de engaño y manipulación plantea un dilema que debe abordarse con urgencia. En el contexto educativo, los estudiantes o docentes pueden ser víctimas de ataques que simulan actividades académicas legítimas como: tutorías, llenado de formularios, trámites administrativos y académicos o encuestas institucionales. Esto compromete la seguridad individual y la integridad de las comunidades académicas.

El volumen y la complejidad de los ataques de ingeniería social potenciados por la IA puede superar lo que la ciberseguridad tradicional puede manejar sin asistencia tecnológica. Por ejemplo, los correos electrónicos de phishing ya no contienen errores evidentes de redacción ni formatos sospechosos; ahora son generados mediante modelos de lenguaje avanzados capaces de imitar casi a la perfección a un remitente legítimo. Además, los atacantes pueden lanzar miles de intentos simultáneamente en paralelo, dirigidos a diferentes objetivos.

La educación en el ámbito de la ciberseguridad se debe implementar para hacer frente a estos nuevos escenarios y desafíos, ya no es suficiente enseñar técnicas tradicionales de defensa, se requiere el desarrollo de competencias para identificar patrones de manipulación generados por IA. Las estrategias presentadas en este artículo tienen como objetivo integrar habilidades técnicas bajo una conciencia ética, en busca de preparar a los futuros profesionistas para hacer frente a las amenazas que implica la ingeniería social.

Conclusiones

Las técnicas de engaño y manipulación automatizada potenciadas por chatbots de IA están evolucionando cada vez más rápido que las respuestas pedagógicas lo que representa un riesgo serio, que debe ser atendido desde los diferentes niveles de educación. Esto plantea nuevos desafíos para la formación académica no solamente en las ciencias duras como la ingeniería sino también las disciplinas blandas como: el derecho, la educación, la comunicación y las ciencias sociales, donde la comprensión crítica de la IA y la ciberseguridad se vuelve cada vez más relevante. Este artículo destaca la necesidad de integrar contenidos actualizados e innovadores en los planes y programas de estudios, prácticas reflexivas y de análisis del lenguaje, para contribuir en la formación de profesionistas capaces de detectar, identificar, contener y neutralizar amenazas emergentes con la finalidad de construir entornos educativos más seguros en beneficio de la sociedad.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Escuela Militar de Ingeniería por el apoyo brindado y al SECIHTI por el financiamiento de la investigación

mediante el SNII.

Referencias

- [1] Bardají E., Ataques de phishing con Inteligencia Artificial, Un peligro en aumento. ESED - Cyber Security & IT Solutions, 2025.
- [2] Birthriya, S. K., Ahlawat, P. y Jain, A. K., A Comprehensive Survey of Social Engineering Attacks: Taxonomy of Attacks, Prevention, and Mitigation Strategies, *Journal of Applied Security Research*, 20[2], pp.244–292, 2024. Recuperado de: <https://doi.org/10.1080/19361610.2024.2372986>
- [3] CERT-MX, Manual básico de ciberseguridad para la micro, pequeña y mediana empresa MiPyME, 2023. <https://www.gob.mx/gncertmx/documentos/guias-de-ciberseguridad-263401>
- [4] Check Point, 11 Tipos de ataques de ingeniería social, Check Point Software Technologies Ltd, 2025. <https://www.checkpoint.com/es/cyber-hub/threat-prevention/social-engineering-attacks/11-types-of-social-engineering-attacks/>
- [5] CISA, Malware, Phishing, and Ransomware, CISA, 2025. Recuperado de: <https://www.cisa.gov/topics/cyber-threats-and-advisories/malware-phishing-and-ransomware>
- [6] ENISA, ENISA Threat Landscape 2023: Artificial Intelligence Abuse in Social Engineering, European Union Agency for Cybersecurity, 2024. <https://www.enisa.europa.eu/publications> Falade, P. V., Decoding the threat landscape: Chatgpt, fraudgpt, and wormgpt in social engineering attacks. arXiv preprint arXiv:2310.05595, 2023. Disponible

- en: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.05595>
- [7] González-Hugo, M. P. y Quevedo-Sacoto, A. S., Tendencias actuales en ataques de Ingeniería social. Revisión de literatura, MQRInvestigar, 9[1], e203, 2025. <https://doi.org/10.56048/MQR20225.9.1.2025.e203>
- [8] Li, D., Chen, Q. y Wang, L., Phishing Attacks: Detection and Prevention Techniques. Journal of Industrial Engineering and Applied Science, 2[4], pp.48–53, 2024. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12789572>
- [9] Olague, M. y Olague, G., Ciencia e Ingeniería de la Inteligencia Artificial, Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería, [135], pp.79-86, 2025. Recuperado de: <https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/490>
- [10] Reed, S., Zolna, K., Parisotto, E., Colmenarejo, S. G., Novikov, A., Barth-Maron, G., ... y de Freitas, N., A generalist agent. arXiv preprint arXiv:2205.06175, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.06175>
- [11] Schmitt, M. y Flechais, I., Digital deception: generative artificial intelligence in social engineering and phishing. Artif Intell Rev 57, 324, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10973-2>

ENTRE DIENTES Y GARRAS: ¿CÓMO COEXISTEN LOS DEPREDADORES EN CHIHUAHUA?

Biól. Jorge L. Reyes Díaz

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad
Iztapalapa

Dr. Carlos A. López González

Universidad Autónoma de Querétaro

Dra. A. Alondra Castro Campillo

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad
Iztapalapa

Dra. Nalleli E. Lara Díaz

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad
Iztapalapa

Abstract

Northwestern Chihuahua hosts five enigmatic predators that feed on the flesh of their prey to survive, though when the latter are scarce, they also take advantage of other resources such as plants and insects. Although at first glance predators share a great diversity of food items, interaction network analyses suggest that each predator may prefer certain prey combinations (modules), thus allowing Mexican wolves, coyotes, black bears, pumas and bobcats to coexist, maintaining the ecosystem balance. Community-based studies of carnivores may be key to their conservation in Mexico.

Keywords: Carnivore community; feeding competition; trophic modularity; white-tailed deer.

Resumen

El noroeste de Chihuahua alberga cinco enigmáticos depredadores que se alimentan de la carne de sus presas para sobrevivir, pero cuando éstas escasean, aprovechan otros recursos como plantas e insectos. Aunque a simple vista los depredadores comparten una gran diversidad de componentes alimentarios, los análisis con redes de interacción sugieren que cada uno de ellos podría preferir determinadas combinaciones de presas (módulos), permitiendo así que lobos mexicanos, coyotes, osos negros, pumas y gatos monteses coexistan, manteniendo el equilibrio del ecosistema. El estudio comunitario de los carnívoros puede ser clave para su conservación en México.

Palabras clave: Comunidad de carnívoros; competencia alimentaria; modularidad trófica; venado cola blanca.

Introducción

El noroeste del territorio mexicano

suele ser retratado como un enorme desierto inhóspito en el que solo las especies más resistentes pueden sobrevivir. Sin embargo, la región también posee grandes extensiones de matorrales, pastizales, e incluso bosques tropicales y templados que resguardan una asombrosa biodiversidad (NALCMS-CEC, 2023). Tanto así, que posee la comunidad de carnívoros depredadores más grande de todo el país (Figura 1; López-González y García-Mendoza, 2024), en donde destaca la presencia de gatos monteses (*Lynx rufus*), ocelotes (*Leopardus pardalis*), pumas (*Puma concolor*), jaguares (*Panthera onca*), osos negros (*Ursus americanus*), coyotes (*Canis latrans*) y lobos mexicanos (*C. lupus baileyi*). Una comunidad tan grande de depredadores requiere de una comunidad mucho mayor de presas para alimentarse, las cuales incluyen vertebrados y otros recursos disponibles en el medio tales como insectos, hongos o productos de origen vegetal (e. g., hojas, tallos, frutos, etc.). En este sentido, encontrar alimento en una región con tanta variabilidad de paisajes y rica en biodiversidad no debería suponer un problema para los depredadores. No obstante, en el último par de siglos el medio silvestre ha sido sometido a constantes cambios derivados de la presencia de una sola especie: los seres humanos.

Los humanos hemos provocado un gran deterioro en todos los ecosistemas del mundo. La constante expansión de los asentamientos humanos, la sobreexplotación de recursos forestales, mineros y acuáticos, así como el desarrollo de prácticas agropecuarias para producir nuestros propios alimentos se han traducido en procesos de gran impacto ecológico como el calentamiento global, la contaminación,

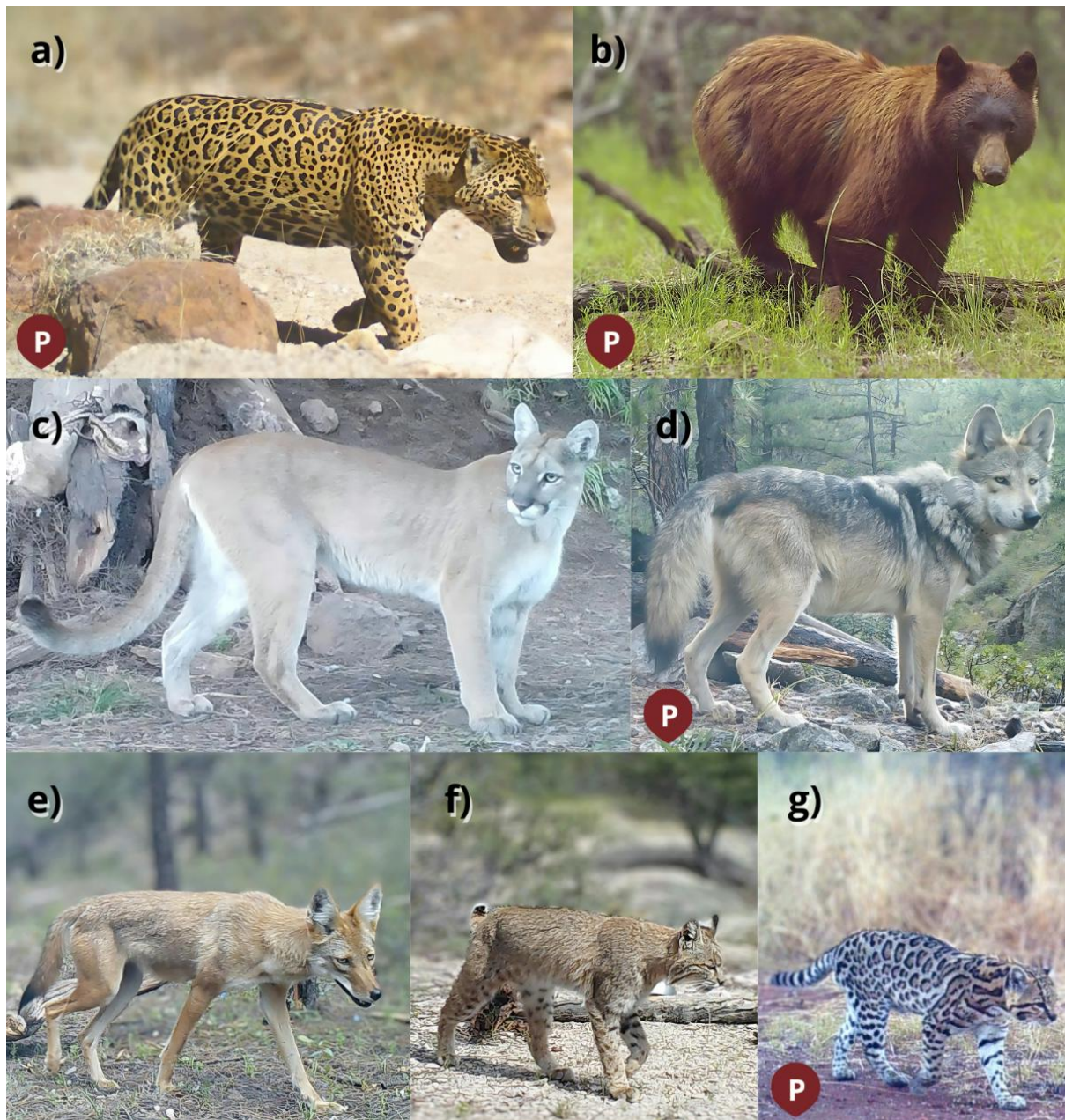


Figura 1: Comunidad de carnívoros depredadores del noroeste de México: a) jaguar, b) oso negro, c) puma, d) lobo mexicano, e) coyote, f) gato montés y g) ocelote. La “P” indica que la especie se encuentra actualmente en “Peligro de extinción” en la NOM-059-SEMARNAT-2010. Fotografías: b – f, UAQ/ITZENI/CONANP; a, g, NJP/ACN.

la extinción de especies y el desmonte (eliminación de toda la vegetación de una zona; Reynosa Navarro, 2015). En el noroeste de México, la heterogeneidad del paisaje ha permitido aprovechar las grandes planicies para la producción agrícola, los bosques frondosos de las serranías y cañadas para la silvicultura y las grandes extensiones

de terreno para la producción extensiva de ganado bovino. Dichas prácticas productivas han reducido considerablemente el hábitat para muchas especies silvestres, obligándolas a utilizar áreas más pequeñas y remotas a la población humana (Inskip y Zimmermann, 2009); o bien, a superponer sus áreas con las actividades

humanas, aumentando la probabilidad de conflictos, particularmente con los depredadores. Contrario a la creencia de muchas personas que ven a los depredadores como 'fieras' que amenazan la vida de los seres humanos, los principales conflictos humano-depredador están representados por eventos de depredación y consumo de ganado (Flores-Armillas *et al.*, 2020). La situación provoca que los depredadores no sean bien recibidos por los productores ganaderos de la región, quienes en muchas ocasiones optan por eliminar a aquellas especies que amenazan a su ganado, tal como ocurrió con el oso plateado (*U. arctos nelsoni*), llevando a esta subespecie a su extinción en México y los Estados Unidos de América durante el siglo XX (Brown, 1983).

Diversos estudios en el mundo han demostrado una clara asociación entre la depredación de ganado y la poca disponibilidad de presas silvestres (Parsons *et al.*, 2022), la cual a su vez fue ocasionada por la destrucción de sus hábitats y por la insuficiencia de recursos alimentarios debido a la competencia con el ganado, o simplemente porque muchas de sus presas silvestres también son cazadas por los seres humanos, como son los venados cola blanca (*Odocoileus virginianus*), venados bura (*O. hemionus*), borregos cimarrones (*Ovis canadensis*), pecaríes (*Dicotyles tajacu*), conejos (*Sylvilagus spp.*), guajolotes (*Meleagris gallopavo*), entre otras (SEMARNAT, 2024). Se podría suponer que la disminución de presas silvestres disponibles en la región provocaría una mayor competencia entre la comunidad de carnívoros, ya de por sí envueltos en una constante lucha por los recursos alimenticios disponibles.

Pero ¿esto es así? o ¿cómo es que diferentes especies de depredadores pueden coexistir en la misma región aún con los efectos que desencadenados por las actividades humanas? Los biólogos podemos investigar la dieta de los depredadores y conocer qué especies consumen, lo que nos permite comprender el funcionamiento de la comunidad de carnívoros en un área determinada, además de ayudarnos a tomar mejores decisiones para elaborar planes de manejo y conservación de los ecosistemas, sus comunidades y los hábitats de las especies silvestres.

¿Qué comen los depredadores y cómo lo sabemos?

La fauna silvestre, y en particular los grandes depredadores, son animales que suelen ser muy sensibles a la presencia humana, por lo que muchos de ellos casi siempre buscarán mantenerse alejados u ocultos por su propia seguridad y bienestar. La situación dificulta que podamos observar directamente a los depredadores consumiendo a sus presas (interacciones tróficas), y por tanto necesitamos utilizar otro tipo de métodos para conocer su dieta. Los análisis de dieta pueden seguir diferentes métodos; por ejemplo, en el pasado solían revisarse directamente los estómagos de los depredadores que habían sido cazados. Actualmente es más frecuente revisar sus excrementos con lo que nos aseguramos de no perturbar a los depredadores y a los ecosistemas (Alanis-Hernández *et al.*, 2024). Además, podemos recolectar un número representativo de muestras fecales para ayudarnos a identificar una mayor diversidad de presas... pero ¿cómo?

Los excrementos contienen información increíble, desde su tamaño y forma nos ayudan a suponer a qué tipo de depredador pertenecen, aunque eso

no siempre es suficiente. Para tener certeza de que se trata de la especie de depredador que suponemos, podemos realizar análisis genéticos. Mientras el excremento recorre el tracto digestivo del depredador, algunas de las células de su intestino quedan adheridas a la superficie del excremento, acarreando consigo su ADN o firma genética. Si logramos extraer y secuenciar el ADN en un laboratorio, podemos conocer con precisión a qué depredador pertenece el excremento analizado

(Monterroso *et al.*, 2019). Después de los análisis genéticos, podemos revisar directamente los excrementos y detectar los restos no digeridos de las presas que resguardan en su interior, tales como pelo y huesos, o incluso materia vegetal como restos de hojas o semillas (Figura 2), que utilizaremos para saber qué especies consumieron los depredadores (Alanis-Hernández *et al.*, 2024). Sabiendo esto, hablemos ahora sobre el noroeste de Chihuahua.



Figura 2: Ejemplos selectos de restos de componentes alimentarios no digeridos que se recuperaron de los excrementos de los depredadores: a) restos óseos de ratas y ratones; b) diferentes tipos de semillas; c) mechón de pelo de guardia de venado cola blanca; d) extremidades de un insecto. Fotografías: Jorge L. Reyes-Díaz.

La comunidad de carnívoros del noroeste de Chihuahua, México
Durante cinco años (2018-2022) colectamos más de 2000 excrementos de mamíferos depredadores en el noroeste del estado de Chihuahua. Al realizar

los análisis genéticos correspondientes, confirmamos que pertenecían a cinco especies de carnívoros que ahí habitan: coyotes, lobos mexicanos, osos negros, gatos monteses y pumas. Después de un exhaustivo lavado de los excrementos

y de la revisión de los componentes no digeridos, logramos identificar un total de 88 especies entre plantas (árboles, arbustos, hierbas) y animales (e. g., insectos, reptiles, aves, pero principalmente mamíferos) en la dieta de esta comunidad de carnívoros.

A pesar del elevado número de especies en la dieta de los depredadores, algunas de ellas fueron muy raras en sus excrementos, por lo que supusimos que su frecuencia de consumo también era baja y solo fueron presas incidentales. Por lo tanto, redujimos nuestra lista de componentes alimentarios a las 48 especies más importantes en la dieta de la comunidad de carnívoros del noroeste de Chihuahua. Cabe destacar que los depredadores pueden consumir estas presas en diferentes proporciones, por lo que algunas pueden ser importantes para unos depredadores, pero no para otros. Lo anterior lo podemos visualizar y analizar a través de redes de interacción trófica.

Las redes de interacción y los secretos de la coexistencia

Las redes de interacción trófica son una herramienta bastante útil para observar cómo se distribuyen ecológicamente las especies de una comunidad para coexistir en el mismo tiempo y espacio (Del Val de Gortari, 2022). Las redes están conformadas por un conjunto de nodos y líneas: los nodos representan a cada una de las especies de la comunidad, mientras que las líneas que los unen representan la interacción entre depredadores y presas. Además, el grosor de la línea puede indicarnos el peso de la interacción, es decir, la frecuencia con que ocurre y por tanto su importancia relativa en la comunidad (Martínez-Falcón *et al.*, 2019).

Las redes de interacción son muy

comunes para evaluar comunidades mutualistas como ocurre en especies interactuantes que obtienen algún beneficio (e. g., entre plantas y polinizadores). Sin embargo, el uso de redes de interacción antagónicas (*i. e.*, donde uno de los interactuantes se beneficia y el otro se ve perjudicado) suele ser raro, más aún cuando se trata de redes entre los depredadores y sus presas dentro de comunidades de mamíferos. Por ello, consideramos que utilizar estas redes de interacción no sólo es enriquecedor para analizar la ecología trófica de las comunidades de carnívoros, sino que además brindan una forma muy interesante de representar los resultados.

Para facilitar la visualización y representación de las presas en la red, agrupamos a los insectos, pequeños roedores (ratas, ratones y tuzas), ardillas (terrestres y arborícolas), conejos y zorrillos, lo que nos facilitó crear una red de interacción entre cinco depredadores y 27 componentes alimentarios (Figura 3). La red de interacciones nos permitió visualizar que los osos negros, pese a ser los depredadores de talla más grandes de la comunidad, suelen consumir con mayor frecuencia productos de origen vegetal e insectos, principalmente frutos de manzanita (*Arctostaphylos pungens*), encinos (*Quercus sp.*) y enebros (*Juniperus sp.*), mientras que los animales son raros en su dieta. Otros omnívoros en la comunidad son los coyotes, los cuales observamos que en la región suelen consumir con mayor frecuencia pequeños roedores, pero también presas grandes como venado cola blanca y ganado bovino (*Bos taurus*), lo que representa una mayor proporción de animales en comparación con otras localidades del país (Jensen *et al.*, 2022). Los pequeños roedores y conejos fueron las presas

principales de los gatos monteses y, sorprendentemente, también para los pumas, aunque estos depredadores de talla grande también consumieron con frecuencia venados y ganado bovino, como se ha demostrado en otras regiones de América (Karandikar *et al.*, 2022). Por último, los lobos mexicanos se especializaron en el

consumo de presas de talla grande, tal como venados, ganado bovino y carne de cerdo doméstico, siendo esta última suplementada como parte de las estrategias para ayudarlos a reestablecerse en vida libre (Reyes-Díaz *et al.*, 2024).



Figura 3: Red de interacción trófica ponderada entre cinco depredadores (1-5) y sus presas principales (6-29) en el noroeste de Chihuahua, México. El grosor de la línea representa la frecuencia de ocurrencia de la interacción. Las líneas verdes representan consumo frecuente y las azules consumo incidental o raro.

A pesar de la alta diversidad de presas que detectamos y el hecho de que casi todas son consumidas por los cinco depredadores del estudio (superposición de nicho), también observamos que existen grupos de presas o especies particulares (módulos) que son consumidas con mayor frecuencia por cada especie de depredador (modularidad de la red), lo cual sugiere la dependencia principal de cada depredador por tales módulos. En este sentido, podemos observar que los gatos monteses y pumas comparten

el mismo módulo, donde destaca la presencia de aves, conejos, pequeños roedores, carnívoros e incluso pecaríes (*Dicotyles tajacu*); los lobos mexicanos presentaron un módulo caracterizado por la presencia de ardillas, zorrillos listados (*Mephitis sp.*) y mamíferos de talla grande. Los coyotes presentaron el módulo más amplio donde destacaron diferentes especies de pequeños roedores, carnívoros y una alta diversidad de plantas, mientras que el módulo de los osos negros se distinguió por la presencia de plantas e insectos (Figura 4).

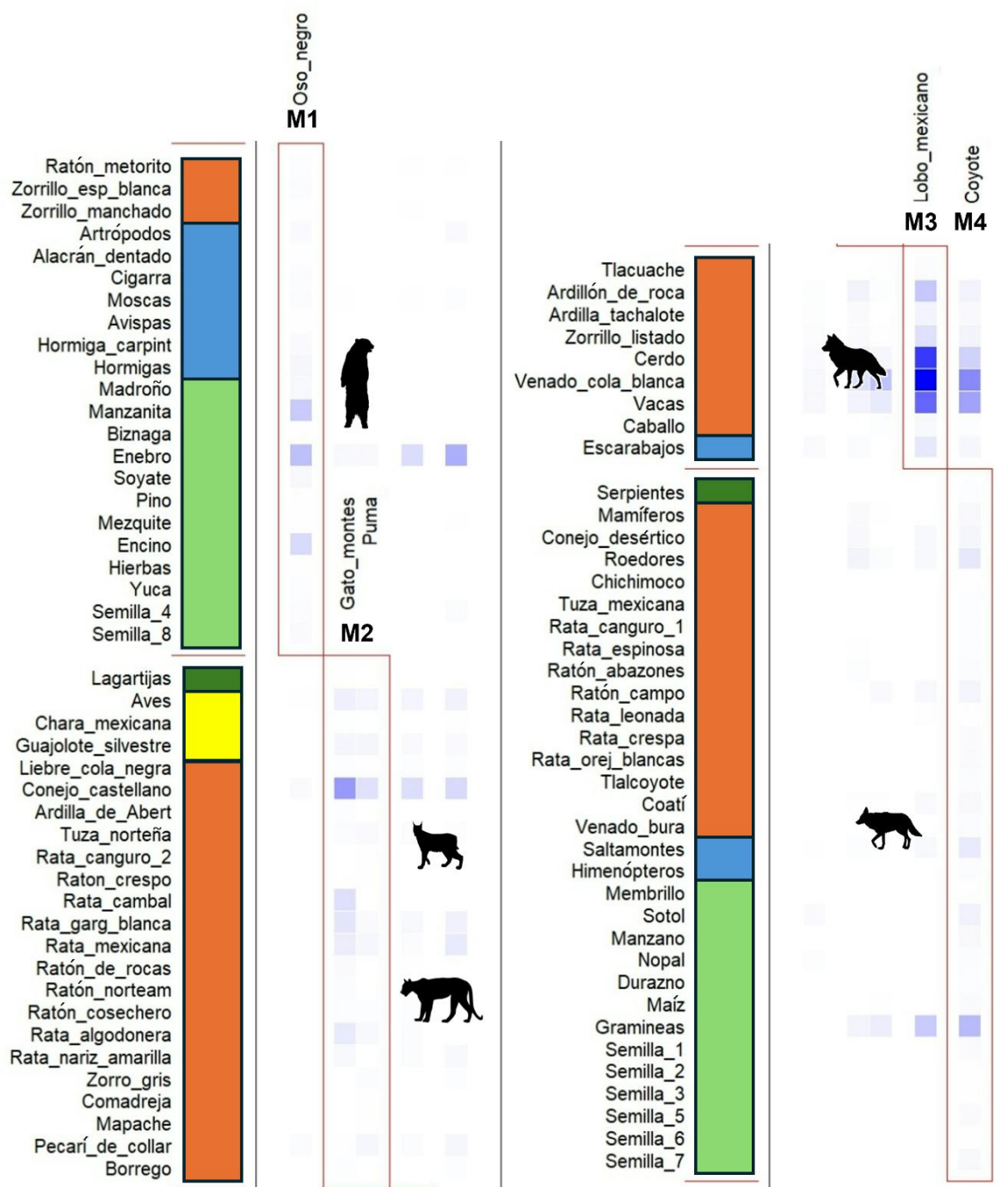


Figura 4: Módulos de presas detectadas para cada depredador en la comunidad del noroeste de Chihuahua, México. A la derecha del listado de presas, los recuadros de colores indican el tipo de componentes alimentario (mamíferos, naranja; aves, amarillo; reptiles, verde oscuro; artrópodos, azul y materia vegetal, verde claro; las semillas numeradas representan especies de plantas que no se pudieron identificar taxonómicamente). El recuadro rojo delimita a las especies que conforman el módulo (M1-M4) de componentes alimentarios para cada carnívoro y dentro de ellos, la intensidad de los cuadros de color azul representa la frecuencia de interacción entre el depredador y las presas (desde blanco = escasa frecuencia, hasta el azul marino = alta frecuencia).

La identificación de módulos puede mostrarnos parte del éxito de la comunidad de depredadores en el noroeste de Chihuahua, ya que cada uno puede ser más o menos dependiente de determinados recursos. Esta “repartición de presas” puede representar la clave para que una diversidad alta de depredadores coexista en la misma región. Aunque es claro que existen presas que son consumidas por los cinco depredadores como los pequeños roedores, conejos o incluso ardillas, una de las presas más importantes por su talla es el venado cola blanca. Los venados son una especie clave en la comunidad, ya que son consumidos por lobos, coyotes, pumas y en menor medida por gatos monteses y osos negros, siendo la presa silvestre más grande de la que se alimentan. La situación es muy parecida a lo que ocurre con el ganado bovino debido a que los depredadores pueden consumir becerros que son más pequeños y fáciles de capturar, aunque no debemos descartar la posibilidad de que los depredadores se alimenten de individuos que murieron por causas ajenas a la depredación como la sequía, la intoxicación con plantas, vejez y/o las enfermedades (Reyes-Díaz *et al.*, 2024). Curiosamente, encontramos semillas de frutos de enebro en los excrementos de todos los depredadores. Es bastante claro que los osos, coyotes e incluso lobos consumen estos frutos, ya que sus excrementos están repletos de sus semillas. Sin embargo, tanto en gatos monteses como pumas, la frecuencia de semillas y otras partes de plantas es menos frecuente, por lo que es probable que no las hayan ingerido directamente, ¡sino que se encontraran en los estómagos de sus presas principales (roedores y conejos)! de tal manera que así fue como terminaron en los excrementos de los felinos (Sarasola *et al.*, 2016).

Conclusión

El estudio de las comunidades de depredadores y presas en el noroeste de Chihuahua nos permite entender cómo todas estas especies logran coexistir en un ambiente diverso y cambiante. A través del análisis de redes de interacción, sugerimos que la repartición de recursos alimentarios y la especialización en ciertos grupos de presas puede ser la estrategia clave para mantener el equilibrio en las comunidades. Sin embargo, la presión antropogénica, que incide en la alteración y pérdida de hábitat, así como la persecución por la depredación de ganado, continúa representando un desafío para la conservación de los carnívoros. Nuestra investigación amplía el conocimiento sobre la ecología de los depredadores, pero también hace énfasis en implementar estrategias integrales de manejo y conservación. Necesitamos prestar atención a la biodiversidad del noroeste mexicano y establecer un enfoque colaborativo que considere las necesidades de las especies silvestres y de las comunidades humanas de la región, ya que incluso éstas pueden extrapolarse al noreste del país donde también se distribuyen las mismas especies de depredadores y algunas presas. Consideramos que si alcanzamos el balance entre estas prioridades podremos garantizar la supervivencia de las especies y los ecosistemas que habitan.

Agradecimientos

JLRD agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI; antes CONAHCYT) la asignación de la beca de maestría (CVU 2001187) para la realización del presente trabajo. Asimismo, NELD agradece a la SECIHTI por el apoyo otorgado a través del Programa

de Estancias Posdoctorales (CVU 270114). Conjuntamente, agradecemos el financiamiento y apoyo logístico de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), Arizona Game Fish Department, Defenders of Wildlife, New Mexico Game and Fish Department, U.S. Fish and Wildlife Service, Wild Earth Guardians, y Soluciones Ambientales itzeni, A.C. También, la importante labor de los miembros del equipo técnico del proyecto de reintroducción de lobo mexicano, quienes fueron indispensables para la búsqueda y recolecta de muestras. A los dueños y personal de los predios particulares y ejidos que permitieron el acceso a sus propiedades para la búsqueda de rastros. Y a todas y todos los estudiantes de la licenciatura en Biología de la UAQ que ayudaron en el procesamiento de las muestras.

Referencias

- [1] Alanis-Hernández, L.A., Sánchez-Rojas, G. y Ramírez-Bravo, O.E., Entre hábitos y heces fecales: un vistazo a las dietas de los mamíferos carnívoros. *RDU*, 25[2], 2024, <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2024.25.2.6>
- [2] Brown, D.E., *The Wolf in the Southwest: The Making of an Endangered Species*, University of Arizona Press, Tucson, 1983, 195pp.
- [3] Del Val de Gortari, E., Redes de interacciones para el estudio de la biodiversidad. *RDU*, 23[2], 2022, <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2022.23.2.9>
- [4] Flores-Armillas, V.H., Valenzuela-Galván, D., Peña-Mondragón, J.L. y López-Medellín, X., Human-wildlife conflicts in Mexico: Review of status and perspectives. *Ecosis Regur Agropec*, 7[1], e2274, 2020, <https://doi.org/10.19136/era.a7n1.2274>
- [5] Inskip, C. y Zimmermann, A., Human felid conflict: a review of patterns and priorities world. *Oryx*, 43, pp.18-34, 2009, <https://doi.org/10.1017/S003060530899030X>
- [6] Karandikar, H., Serota, M.W., Sherman, W.C., Verta, G., Kremen, C. y Middleton, A.D., Dietary patterns of a versatile large carnivore, the puma (*Puma concolor*). *Ecol Evol*, 12[6], e9002, 2022, <https://doi.org/10.1002/ece3.9002>
- [7] Jensen, A.J., Marneweck, C.J., Kilgo, J.C. y Jachowski, D.S., Coyote diet in North America: geographic and ecological patterns during range expansion. *Mamm Rev*, 52[4], pp.480-496, 2022, <https://doi.org/10.1111/mam.12299>
- [8] López-González, C. y García-Mendoza, D., Mammals (Tetrapoda: Mammalia) of the Sierra Madre Occidental, Mexico: megadiversity in an area of high environmental complexity. *Acta Zool Mex (n.s.)*, 40[1], pp.1–35, 2024, <https://doi.org/10.21829/azm.2024.4012585>
- [9] Martínez-Falcón, A.P., Martínez-Adriano, C.A. y Dáttilo, W., Redes complejas como herramientas para estudiar la diversidad de las interacciones ecológicas. En C.E. Moreno (Ed.). *La biodiversidad en un mundo cambiante: fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio*, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo/Libermex, Pachuca, 2019, pp.265-283.

- [10] Monterroso, P., Godinho, R., Oliveira, T., Ferreras, P., Kelly, M.J., Morin, D.J., Waitts, L.P., Alves, P.C. y Mills, L.S., Feeding ecological knowledge: the underutilised power of faecal DNA approaches for carnivore diet analysis. *Mamm Rev*, 49[2], pp.97-112, 2019, <https://doi.org/10.1111/mam.12144>
- [11] North American Land Change Monitoring System – Commission for Environmental Cooperation (NALCMS-CEC), Land cover of North America. At 30 meters. Edition 1.0. Raster digital data. Canada Centre for Remote Sensing (CCRS), Canada Centre for Mapping and Earth Conservation (CCMEO), Natural Resources Canada (NRCan), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), and U.S. Geological Survey (USGS), 2023, <http://www.cec.org/north-american-land-change-monitoring-system/>
- [12] Parsons, M.A., Newsome, T.M. y Young, J.K., The consequences of predators without prey. *Front Ecol Environ*, 20[1], pp.31-39, 2022, <http://doi.org/10.1002/fee.2419>
- [13] Reyes-Díaz, J.L., Lara-Díaz, N.E., Camargo-Aguilera, M.G., Saldívar-Burrola, L.L. y López-González, C.A., The importance of livestock in the diet of Mexican wolf (*Canis lupus baileyi*) in northwestern Mexico. *Wildlife Biol*, 2024[6], e01272, 2024, <https://doi.org/10.1002/wlb3.01272>
- [14] Reynosa Navarro, E., *Crisis ambiental global. Causas, consecuencias y soluciones prácticas*. Múnich: GRIN Verlag GmbH, 2015, 50pp.
- [15] Sarasola, J.H., Zanón-Martínez J.I., Costán, A.S. y Ripple, W.J., Hypercarnivorous apex predator could provide ecosystem services by dispersing seeds. *Sci Rep*, 6, 19647, 2016, <http://doi.org/10.1038/srep19647>
- [16] Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), *Calendario de aprovechamiento de vida silvestre temporada 2024-2025*, 2024, <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/calendario-de-epocas-habiles-2024-2025>

Análisis de la narrativa sobre violencia en México a través de técnicas de Inteligencia Artificial

Ing. Leonardo Ortiz López

Maestría en Ciencias de la Computación, Universidad Autónoma Metropolitana -Azcapotzalco

Dr. Roman Anselmo Mora Gutierrez

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

Dr. Julián Alberto Fresán Figueroa

Departamento de Matemáticas Aplicadas y Sistemas. División de Ciencias Naturales e Ingeniería. Universidad Autónoma Metropolitana -Cuajimalpa

Dr. Sergio de los Cobos Silva

Departamento de Ingeniería Eléctrica. División de Ciencias Básicas e Ingeniería Universidad Autónoma Metropolitana -Iztapalapa

Dr. Pedro Lara Velázquez

Departamento de Ingeniería Eléctrica. División de Ciencias Básicas e Ingeniería Universidad Autónoma Metropolitana -Iztapalapa

Dr. Eric Alfredo Rincón García

Departamento de Ingeniería Eléctrica. División de Ciencias Básicas e Ingeniería Universidad Autónoma Metropolitana -Iztapalapa

Dr. Miguel Ángel Gutiérrez Andrade

Departamento de Ingeniería Eléctrica. División de Ciencias Básicas e Ingeniería Universidad Autónoma Metropolitana -Iztapalapa

Dr. Edwin Montes Orozco

Departamento de Computación, Mecatrónica y Electrónica. Universidad de las Américas -Puebla

Mtro. Gilberto Sinuhe Torres Crockell

Departamento de Ingeniería Mecánica Mecatrónica e Industrial. Tecnológico de Estudios superiores, Ecatepec

Abstract

In the present study, artificial intelligence techniques are used to characterize and analyze the discourse produced by the media regarding violence in Mexico during the 2024–2025 period. The findings indicate a sustained increase in media coverage of violence in Mexico, as well as a transformation in its focus. The media have evolved from reporting isolated data to contextualizing violence as a social and structural phenomenon. Topics such as human rights, femicides, and security strategies are included. Moreover, the discourse shows both territorial and thematic diversification, reflecting a more complex understanding of the problem.

Keywords: Complex Networks, Communities, Natural Language Processing, Sentiment Analysis

Resumen

En el presente estudio, se utilizan técnicas de inteligencia artificial con el propósito de caracterizar y analizar el discurso emitido por los medios de comunicación en relación con la violencia en México durante el periodo 2024-2025. Los hallazgos indican un incremento sostenido en la cobertura mediática acerca de la violencia en México, así como una transformación en su enfoque. Los medios han evolucionado de reportar datos aislados a contextualizar la violencia como un fenómeno social y estructural. Se incluyen temas de derechos humanos, feminicidios y estrategias de seguridad. Además, el discurso presenta una diversificación tanto territorial como temática, lo que refleja una comprensión más compleja del problema.

Palabras clave: Redes Complejas, Comunidades, Procesamiento de

lenguaje natural, análisis de sentimientos

Introducción

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define a violencia como ... “uso intencional de la fuerza física o el poder real o como amenaza contra uno mismo, una persona, grupo o comunidad que tiene como resultado la probabilidad de daño psicológico, lesiones, la muerte, privación o mal desarrollo” ... (OMS, 2002). En otras palabras, la violencia es una conducta (activa o pasiva) donde se ejerce fuerza física, financiera, social, psicología, entre otras con el fin de restringir o limitar los derechos y libertades de uno mismo, de otra persona o comunidad o bien para coaccionarle (Esplugues, 2007)

En la actualidad, México se enfrenta a un reto significativo en el ámbito de la salud pública relacionado con la violencia (Lazcano Ponce, *et al.*, 2025), la cual se manifiesta como una patología en la sociedad, afectando los distintos contextos sociales e individuales, y acarreando repercusiones tales como la ansiedad, la depresión e incluso la muerte de aquellos que la sufren (Aduna, 2024) (Rojas Vázquez, 2025).

Conforme a los resultados proporcionados por la Encuesta Nacional de Victimización y Percepción sobre Seguridad Pública (ENVIPE) 2025 (INEGI, 2025), se observa que en el año 2012 se registró el nivel más alto de percepción de seguridad, marcando un aumento superior al 10% en comparación con el año anterior. En contraposición, el año 2018 representó el punto más bajo en esta percepción, con una disminución del -20.9% en relación con el año precedente. Esta información es coherente con lo que se reporta en el estudio de (Millán-Valenzuela &

Pérez-Archundia, 2019) en el cual se afirmó que la ola de violencia en México durante ese lapso no tenía precedentes y podría considerarse la más significativa en su historia.

Desde el año 2020 hasta la fecha, se ha presentado un cambio promedio de aproximadamente el 3% año tras año. Sin embargo, es necesario señalar que para el año 2025 se presentó un cambio negativo, con una tasa de -4.8% con respecto al periodo inmediato anterior.

En (Zepeda Gil, 2018) se identifican siete elementos que influyen de manera directa en las modificaciones en los niveles de violencia, utilizando la tasa de homicidios como principal referencia. Dichos elementos son: a) intervenciones gubernamentales, b) enfrentamientos entre organizaciones criminales (cárteles), c) falta de coordinación entre instituciones gubernamentales, d) fragilidad del Estado, e) influencia de actores externos, f) contexto socioeconómico y g) conflicto criminal.

En la revisión de la literatura, se han identificado múltiples investigaciones que utilizan técnicas de inteligencia artificial (IA) con el fin de llevar a cabo un análisis y una caracterización de la violencia. Por ejemplo, en el estudio realizado en (García & Ramos, 2020), se presentan un conjunto de herramientas destinados a analizar la dinámica de la violencia en entornos urbanos, tomando como casos de análisis los homicidios en dos ciudades intermedias de Colombia durante el periodo 2010-2016. Asimismo, en el trabajo de (Liu, *et al.*, 2019) se aplica el modelo de redes de escala libre para examinar el fenómeno de la ciber violencia. En otro estudio, (Campedelli, *et al.*, 2019) utilizan un enfoque de redes complejas para identificar grupos latentes pertenecientes a grupos

terroristas, basándose en información relacionada con sus características. Por otro lado, en (Montes-Orozco, *et al.*, 2025) se presenta un análisis de redes complejas dinámicas para caracterizar la violencia en México.

Cronología de la violencia

La violencia en México se expresa de diversas maneras, abarcando desde la delincuencia común hasta el crimen organizado, así como la violencia doméstica y de género. Las repercusiones de esta situación son de gran envergadura y afectan a todos los sectores sociales, lo cual conlleva a un ambiente de inseguridad y temor que obstaculiza el desarrollo social y económico del país.

Como se ha señalado anteriormente, entre los años 2011 y 2025, la violencia en México ha mostrado un comportamiento variable, caracterizado por periodos de incremento, estabilización y retroceso parcial (véase Figura 1).

Con base en los datos de (INEGI, 2025)I, se identifican los siguientes puntos de inflexión: a) en 2015, se evidenció una escalada significativa en los índices de violencia, acentuada por un aumento en los homicidios y otros delitos de alta incidencia; b) durante los años 2017 y 2018, el país atravesó una crisis de seguridad sin precedentes, alcanzando algunos de los niveles más altos de violencia en su historia reciente; c) entre 2019 y 2020, se implementaron nuevas estrategias institucionales y políticas públicas orientadas al control y prevención del delito, lo que permitió cierta contención de las tasas delictivas; y d) a partir de 2021 en adelante, los desafíos persistentes y las condiciones estructurales de desigualdad, impunidad y la presencia del crimen organizado.

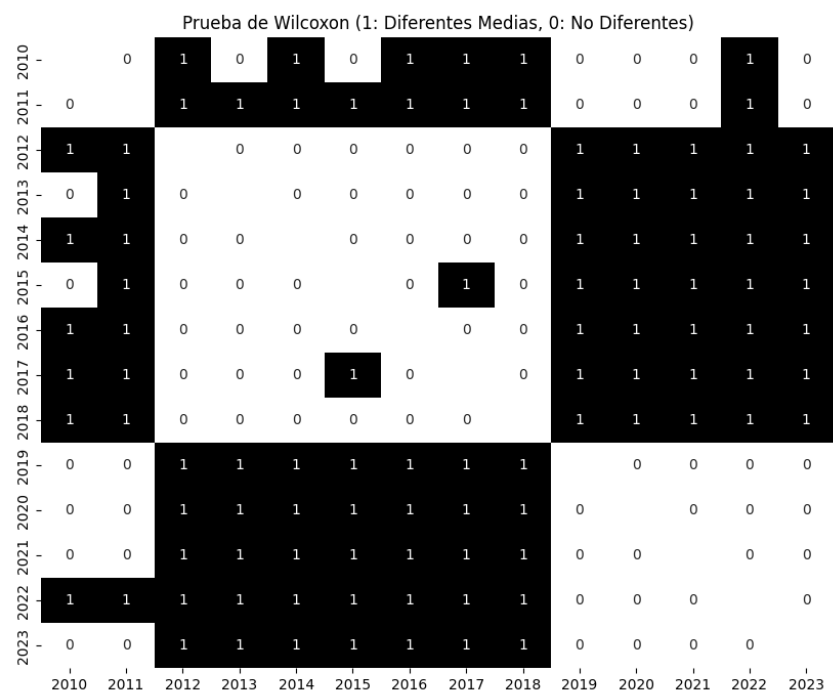


Figura 1: Fluctuaciones de la violencia en México (prueba de Wilcoxon sobre número de delitos registrados)

En la Figura 2 se presenta de manera esquemática los valores normalizados de la Tasa de prevalencia delictiva por cada cien mil habitantes correspondientes a los años 2011 y 2024.

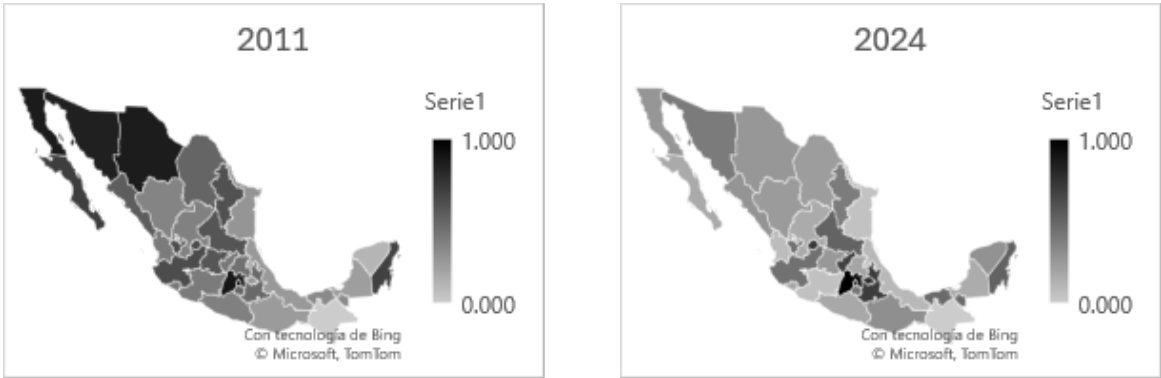


Figura 2: Tasa normalizada de prevalencia de delitos. Construida con base a lo reportado en (INEGI, 2025)

Entre 2011 y 2024, las tasas de delitos varían significativamente entre entidades federativas. Tlaxcala y Yucatán muestran los mayores incrementos, evidenciando un notable aumento delictivo con un cambio superior al 100%. Querétaro y Puebla presentan crecimientos relevantes, posiblemente ligados a urbanización y expansión económica. En contraste, Michoacán, Tamaulipas y Nayarit exhiben reducciones significativas del orden de -80%. La Ciudad de México y el Estado de México muestran variaciones moderadas, sugiriendo estabilidad. En conjunto, se observa un desplazamiento de la incidencia delictiva: entidades con problemas de violencia disminuyen, mientras que las que experimentan crecimiento económico registran incrementos.

La narrativa social y violencia

Como se mencionó con anterioridad, la violencia es una enfermedad social, lo que implica que los diferentes actores afectados por esta cuestión -sean individuos, instituciones o comunidades- tienden a transmitirla a través de sus interacciones con otros (Montes-Orozco, *et al.*, 2025).

De manera análoga a lo que sucede con otras enfermedades, la propagación, permanencia y tasa de mortalidad vinculadas a la violencia han sido materia de análisis y divulgación por parte de diversos actores, tales como investigadores, organismos e instituciones tanto federales como estatales; medios de comunicación y organizaciones civiles, entre otros. Estos actores suelen presentar estadísticas, resultados de investigaciones, opiniones o juicios fundamentados en datos, así como reportes sobre actividades violentas o delictivas; las cuales son dirigidas a la sociedad con la finalidad

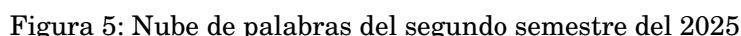
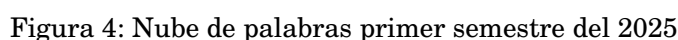
de proporcionar información a los individuos, permitiéndoles así formar su propia opinión.

A partir de la percepción opinión y el juicio de los diversos agentes sociales, así como de las interacciones que se generan entre ellos, la sociedad en su conjunto elabora una narrativa social que aborda en profundidad las particularidades de la violencia que se manifiesta en el país. Esta narrativa no solo facilita la descripción del fenómeno, sino que también se encarga de caracterizarlo, tomando en consideración los patrones comunes que prevalecen en el contexto sociocultural, económico y educativo contemporáneo.

Es importante destacar que la narrativa es un constructo social que se genera a partir de los patrones comunes y recurrentes en la información que es producida y consumida por los agentes sociales; y dicha narrativa influyen profundamente en la manera en que las personas perciben su realidad. Es decir, la narrativa social resulta crucial, ya que se relaciona estrechamente con la cosmovisión y con las emociones persistentes que experimentan los actores sociales en su día a día, reflejando así una comprensión más compleja y matizada de la realidad social que afecta a todos. (Velázquez, 2023)

Metodología para el análisis de la narrativa social

En el presente trabajo se utiliza el procesamiento de lenguaje natural (PLN), el análisis de sentimientos (AS), el análisis de comunidades en redes complejas (ACRC) y la construcción de grafos de conocimiento (GC), con el objetivo de analizar y caracterizar la narrativa social en torno a la violencia durante el período que abarca desde octubre de 2024 hasta octubre de 2025.



En las tablas 1, 2 y 3 se muestran los conceptos asociados a las comunidades más grandes presentes en las redes complejas para cada uno de los periodos analizados.

Tabla 1: Relación Términos y Comunidades para el segundo semestre del 2024

<i>Comunidad</i>	Términos	Tamaño	Centralidad
<i>1</i>	homicidios, promedio, octubre, diario(s)	13	0.04
<i>2</i>	delitos, septiembre, alto, federal, impacto	11	0.02
<i>3</i>	primer, público, claudia, disposición, presidenta	11	0.02
<i>4</i>	autopista, local, puebla, ciento, veracruz	10	0.03
<i>5</i>	méxico, autos, foto, gobierno	9	0.03

Tabla 2: Relación Términos y Comunidades para el primer semestre del 2025

<i>Comunidad</i>	Términos	Tamaño	Centralidad
1	homicidios, ciento, guanajuato, casos, asesinato	27	0.05
2	arma, fuego, país, adolescentes, feminicidios	16	0.06
3	personas, mil, delitos, detenido, hombre	14	0.03
4	octubre, claudia, administración, sheinbaum, pardo	13	0.04
5	méxico, violencia, derechos, infancia, adolescencia	12	0.06

Tabla 3: Relación Términos y Comunidades para el segundo semestre del 2025

<i>Comunidad</i>	Términos	Tamaño	Centralidad
1	policiaca, hombre, octubre, culiacán, vida	23	0.05
2	asesinato, mora, micky, abogado, david	15	0.03
3	méxico, ciudad, fiscalía, general, estrategia	14	0.04
4	casos, mil, homicidios, xico, primer	13	0.04
5	violencia, robo, tres, veracruz, mujere	12	0.04

A partir de lo observado en las nubes de palabras y en las tablas que establecen relaciones entre términos y comunidades dentro de las redes semánticas, se identifican los siguientes ejes principales para cada uno de los periodos establecidos:

Para el segundo semestre de 2024, se centra en homicidios, delitos y seguridad pública, haciendo referencia a instituciones como la Guardia Nacional y figuras políticas como Claudia Sheinbaum. En el primer semestre de 2025, se expande hacia temas relacionados con la violencia contra

adolescentes, feminicidios y el uso de armas de fuego, interrelacionando términos como “homicidios arma fuego” y “derechos infancia”. Para el segundo semestre de 2025, se manifiesta un tono más mediático y narrativo, incluyendo nombres específicos (por ejemplo, Micky Hair, David Cohen) y un énfasis notable en asesinatos, fiscalía, Culiacán y robos, lo que refleja una normalización de la violencia en la vida cotidiana.

La evolución de la red semántica durante los periodos analizados en mostrado en la Figura 6.

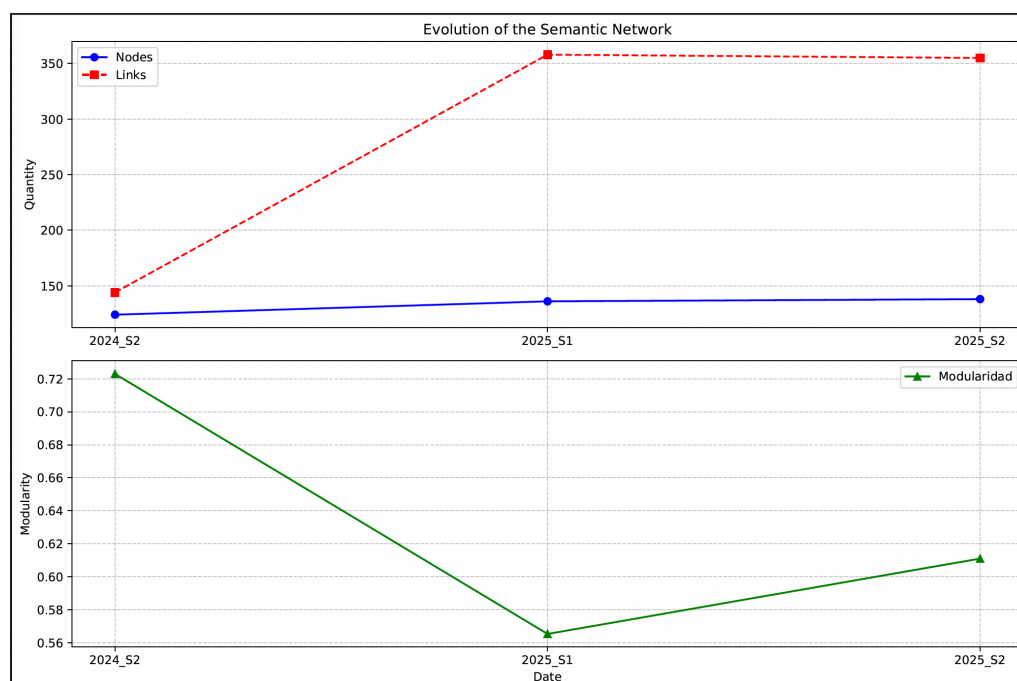


Figura 6: Compartimiento de las redes semánticas.

En lo que respecta a los sentimientos, se ha observado que para el segundo semestre de 2024 el tono es neutral o ligeramente negativo (-0.001). Por el contrario, para el año 2025, el tono experimenta un ligero cambio hacia lo positivo (0.03–0.064), lo que podría atribuirse a una narrativa más institucional o a la presentación de resultados gubernamentales en relación con la violencia.

El gráfico de conocimientos acumulado (mostrado en la Figura 7) se observa la existencia de cuatro núcleos fundamentales de discurso que configuran la narrativa mediática:

A) Núcleo institucional-político, que incluye términos como "México", "fiscalía", "estrategia", y en el cual el uso del término "presidencia" del nombre "Sheinbaum" representa el discurso oficial del gobierno en relación con la seguridad y la justicia.

B) Núcleo mediático-delictivo, se agrupan conceptos tales como "delitos", "policía", "Culiacán", "vida", "mil", "personas", que reflejan notas de crónica policial y la cobertura local de eventos violentos. Destacan ubicaciones específicas como Culiacán, Puebla y Veracruz.

C) Núcleo social y de derechos, los términos "violencia", "infancia", "adolescencia", "derechos", "mujeres" indican una narrativa vinculada a los derechos humanos y la violencia estructural. Los vínculos observados con los feminicidios y los adolescentes manifiestan una continua visibilización de las víctimas más vulnerables.

D) Núcleo narrativo o mediático viral, palabras como "Micky", "David", "feminicidios", "fuego", "arma" se asocian con la personalización de casos emblemáticos o virales que concentran la atención pública.

- línea] Available at: <https://www.insp.mx/informacion-relevante/la-violencia-es-una-crisis-de-salud-publica> [Último acceso: octubre 2025].
- [3] Liu, W. y otros, 2019. Spreading dynamics of a cyber violence model on scale-free networks. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 531(121752).
- [4] Aduna, J. C. H., 2024. Intervención psicosocial y la prevención de las violencias en México. En: *DIVERSIDAD Y COMPLEJIDAD DE LA INTERVENCIÓN PSICOSOCIAL EN MÉXICO*. CDMX: Universidad Autónoma Metropolitana.
- [5] Esplugues, J. S., 2007. ¿Qué es violencia? Una aproximación al concepto y a la clasificación de la violencia. *Daimon Revista Internacional de Filosofía*, Issue 42, pp. 9-21.
- [6] García, W. G. J. & Ramos, R. R., 2020. Contributions of complexity for the understanding of the dynamics of violence in cities. Case study: the cities of Bello and Palmira, Colombia. *Revista Criminalidad*, 62(1), pp. 9-43.
- [7] INEGI, I. N. d. E. y. G., 2025. *Encuesta Nacional de Victimización y Percepción sobre Seguridad Pública (ENVIPE) 2025*. [En línea] Available at: <https://www.inegi.org.mx/programas/envipe/2025/#tabulados> [Último acceso: octubre 2025].
- [8] Millán-Valenzuela, H. & Pérez-Archundia, E., 2019. Educación, pobreza y delincuencia: ¿nexos de la violencia en México?. *Convergencia*, 26(80).
- [9] Montes-Orozco, E., Mora-Gutiérrez, R.-A., Bernal-Jaquez, R. & Aguirre-Guerrero, D., 2025. Analysis of Violence Patterns in Mexico: A Complex Temporal Networks Approach. *Complexity*, pp. 4454714, 11 pages.
- [10] OMS, O. M. d. l. S., 2002. *Informe mundial sobre la violencia y la salud*. [En línea] Available at: https://www.who.int/violence-injury-prevention/violence/world_report/en/ [Último acceso: octubre 2025].
- [11] Rojas Vázquez, J., 2025. *¿Cómo afecta la violencia social en la calidad de vida de los jóvenes en México?*. CDMX: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
- [12] Velázquez, J., 2023. *Constructos teóricos de la narrativa como elemento influyente en la expresión oral*. s.l.:Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Instituto Pedagógico Rural "Gervasio Rubio".
- [13] Zepeda Gil, R., 2018. Siete tesis explicativas sobre el aumento de la violencia en México. *Política y gobierno*, 25(1), pp. 185-211.

Pigmentos vegetales antioxidantes y sus aplicaciones

E. Abilene Lara Mendieta

Estudiante de Licenciatura en Ingeniería Química en Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

E. Valeria Ocampo Guadarrama

Estudiante de Licenciatura en Ingeniería Química en Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

M. en C. Silvia Marquina Bahena

Profesor Investigador de Tiempo Completo en el Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Dra. Mariana Sánchez Ramos

Profesor Asociado de Medio Tiempo, en Departamento de Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa

Abstract

This divulgation work aims to explore natural sources of pigments, describe their functions in plants, and the medicinal applications that humans have given them. On the other hand, it highlights the cultural scope of traditional medicine and, in general, the richness in biodiversity and, consequently, the chemical constituents that provide plants with "healing" properties. It also describes species that have been scientifically studied, validating their widespread use as antioxidants. Finally, an overview is given of what can still be explored to continue making plant pigments especially available without compromising the species' survival.

Keywords: Antioxidant, medicinal plant, plant pigment, carotenoid.

Resumen

Este trabajo de divulgación tiene como objetivo explorar las fuentes naturales de pigmentos, describir sus funciones en las plantas y las aplicaciones medicinales que el ser humano les ha dado. Por otro lado, destaca el alcance cultural de la medicina tradicional y, en general, la riqueza en biodiversidad y, en consecuencia, los componentes químicos que proporcionan a las plantas propiedades curativas". También describe especies que han sido estudiadas científicamente, validando su uso generalizado como antioxidantes. Finalmente, se da una visión general de lo que aún se puede explorar para continuar haciendo que los pigmentos vegetales estén especialmente disponibles sin comprometer la supervivencia de la especie.

Palabras clave: Antioxidante, planta medicinal, pigmento vegetal,

carotenoide.

Plantas medicinales y sus principios activos

Se llaman plantas medicinales a todas aquellas que contienen principios activos que producen efectos curativos en enfermedades de humanos y animales. Estos principios activos se encuentran en alguno de los órganos de la planta (flor, tallo, hoja, raíz, corteza, etc). Los principios activos suelen ser sustancias simples de distinta naturaleza química como alcaloides o bien, mezclas complejas como resinas, aceites esenciales, entre otras. Los compuestos más comunes en las plantas son los azúcares y heterósidos (azúcar más un compuesto sin azúcar). Otros componentes activos de las plantas son lípidos, gomas, mucílagos, principios amargos, taninos, resinas, bálsamos, oleorresinas, ácidos orgánicos, enzimas y vitaminas.^{1,2}

Cabe destacar que, de las 260 000 especies de plantas conocidas, solo un 10 % son consideradas como medicinales y han sido fundamentales en la historia y cultura de muchos pueblos indígenas. Su conocimiento ha sido transmitido de generación en generación y han sido empleadas para tratar diversas enfermedades a través de pomadas, jarabes, tés, jabones y otros productos naturales. A pesar de que su uso ha disminuido con el avance de la medicina moderna, siguen siendo una alternativa válida en muchas comunidades, especialmente en zonas rurales donde el acceso a fármacos industriales es limitado.²

Las plantas medicinales poseen diversas propiedades como las gastro-protectoras, antimicrobianas, cardio-protectoras, antioxidantes, entre otras. Particularmente, las propiedades

Tabla 1: Capacidad Antioxidante de plantas medicinales mediante el método DPPH.

Muestra	Parte de la planta	Extracto	% Captación de Radical Libre
Vitamina C (Ácido ascórbico)	—	—	92.82
<i>Cinnamomum zeylanicum</i>	Corteza	Etanol	97.59*
<i>Calophyllum brasiliense</i>	Hoja	Metanol	99.76**
<i>Myrciaria dubia</i>	Fruto	Metanol	98.09**
<i>Minthostachys mollis</i>	Hoja	Acuoso	92.41**
<i>Alchornea castaneifolia</i>	Hoja	Metanol	75.96**
<i>Calophyllum brasiliense</i>	Hoja	Acuoso	110.56***
<i>Smallanthus sonchifolius</i>	Hoja	Etanol	103.19****
<i>Lepidium peruvianum</i>	Hipocótilo	Acuoso	95.55****
<i>Lepidium meyenii</i>	Hipocótilo	Metanol	88.21****

Nota: los asteriscos representan lo siguiente: *1 µg/mL, **50 µg/mL, ***100 µg/mL y ****200 µg/mL.

Estos resultados destacan el potencial de especies vegetales como fuentes naturales de compuestos antioxidantes con posibles aplicaciones en la salud y alimentación.

De los compuestos conocidos, los carotenoides son una de las principales familias de antioxidantes naturales presentes en las plantas. Las pruebas biológicas respaldan el efecto protector de los carotenoides frente al desarrollo de enfermedades crónicas y degenerativas, por lo que su estudio ha generado un interés significativo en el

sector salud.

Carotenoides y sus funciones

Los carotenoides son pigmentos liposolubles naturales sintetizados por plantas, algas y bacterias fotosintéticas. Actúan como antioxidantes naturales, protegiendo a las células del estrés oxidativo mediante la neutralización del oxígeno y radicales libres. Además, algunos carotenoides tienen actividad provitamina A, lo que los hace esenciales para la nutrición humana, los carotenoides más comunes se muestran en la figura 2.^{4,5}

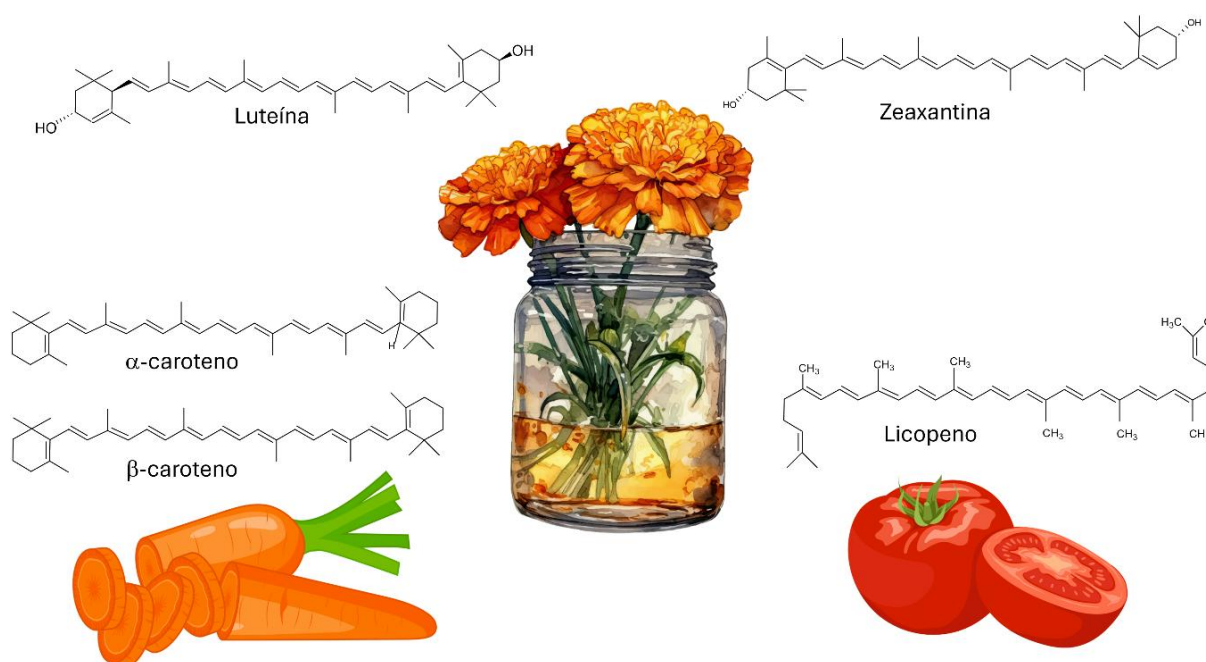


Figura 2: Estructuras de carotenoides comunes y sus principales fuentes. Los carotenoides juegan diversos papeles en las plantas, uno de ellos es actuar como filtros de luz azul y disipar el exceso de energía lumínica que podría causar daño a las células de la misma planta, también evitan la oxidación de lípidos, proteínas y ADN en las células vegetales, captan la energía de la luz y la transfieren a la clorofila para optimizar la producción de energía y proporcionan colores llamativos a flores y frutos para favorecer la reproducción de plantas mediante polinización y dispersores de semillas (Figura 3).^{4,5}

Los carotenoides también funcionan como protección cardiovascular. Por ejemplo, el licopeno ha demostrado su capacidad para reducir el riesgo de enfermedades del corazón, puesto que disminuye el daño oxidativo en los vasos

sanguíneos. Además, el β -caroteno y la luteína contribuyen a la reducción de la inflamación y la peroxidación lipídica, lo que a su vez disminuye el riesgo de arteriosclerosis. En cuanto a la salud ocular, la luteína y zeaxantina

protegen la retina del daño causado por la luz azul, reduciendo el riesgo de degeneración macular y cataratas.

Asimismo, la luteína es un filtro natural de la luz dañina y protege las células del ojo del daño oxidativo.^{4,5}

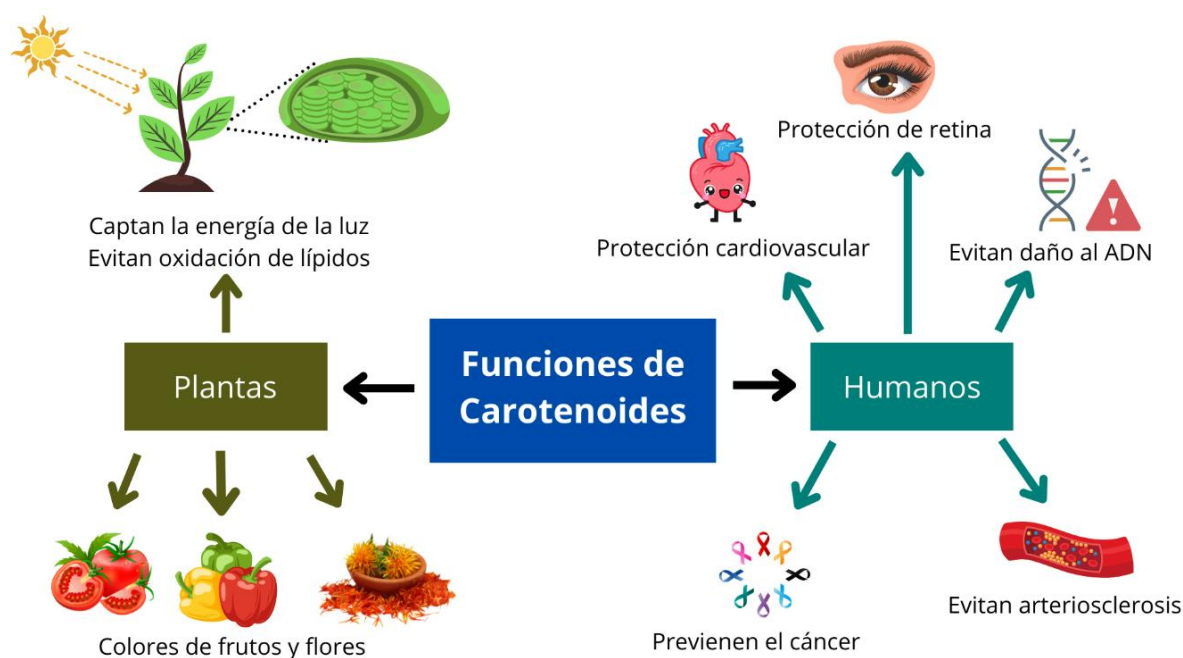


Figura 3: Principales funciones de carotenoides en plantas y humanos. Estos compuestos forman una parte muy importante de las plantas y han sido estudiados por su papel en la salud humana, entre sus principales aplicaciones se encuentra la prevención del cáncer, puesto que se ha demostrado que el β -caroteno, el licopeno y la luteína, pueden reducir la incidencia de cáncer, en especial de pulmón, próstata y digestivo, asimismo, el β -caroteno neutraliza los radicales libres antes de que puedan dañar el ADN celular.^{4,5}

La hipótesis de que nutrientes antioxidantes (β -caroteno, luteína/zeaxantina, licopeno, astaxantina, entre otros) puedan jugar un papel preventivo frente al cáncer, enfermedades cardiovasculares, cataratas y degeneración macular por la edad se basa en pruebas experimentales que sugieren que estos compuestos funcionan como antioxidantes, moduladores de la respuesta inmune, modificadores de procesos inflamatorios y de transducción de señales en y entre células.

Por ello, su acción prooxidante deberá definirse para poder establecer las condiciones adecuadas bajo las cuales

se aseguren los efectos benéficos por el consumo de alimentos con alto contenido en carotenoides.³⁻⁵

En este sentido, diferentes estudios han comprobado la presencia de diversos compuestos carotenoides en distintas plantas y vegetales como lo son la zanahoria, que es rica en α - y β -caroteno, los cuales tienen actividad provitamina A, esencial para la visión y el sistema inmunológico. Otro ejemplo de ello es el Cempasúchil, que contiene luteína y zeaxantina en sus pétalos y estos son utilizados en suplementos para la salud ocular. Asimismo, el tomate es un vegetal con una potente capacidad antioxidante ya que contiene altos

niveles de licopeno, un carotenoide sin actividad provitamínica A. ³

Conclusión

El estudio de las plantas medicinales nos permite identificar los principios activos benéficos para la salud que poseen las mismas, ya que estos disponen un punto importante en el tratamiento y/o prevención de diversas enfermedades tanto en humanos como en animales. Los principales compuestos que muestran una actividad antiinflamatoria, antiviral, antimicrobiana y antitumoral presentes en las plantas son los alcaloides, flavonoides, saponinas y carotenoides, entre otros.

La múltiple investigación científica acerca de estos compuestos nos ha permitido identificar los mecanismos de acción que llevan a el desarrollo de fármacos con base en distintos extractos obtenidos de plantas medicinales que representan una parte fundamental de la medicina tradicional gracias a sus propiedades terapéuticas.

Esto ha llevado a el uso excesivo de estas especies y a la degradación de su entorno poniendo en riesgo la posible disponibilidad futura. Por ello es esencial implementar prácticas sostenibles, como el cultivo in vitro y la cosecha regulada, con el objetivo de concientizar sobre la conservación de estas especies y lograr aprovechar sus diversas propiedades evitando un impacto negativo.

Referencias

- [1] Carranco Jáuregui, M. E., Calvo Carrillo, M. de la C., & Pérez-Gil Romo, F. (2011). *Carotenoides y su función antioxidante: Revisión*. Archivos Latinoamericanos de Nutrición, 61(3), 233-237. Sociedad Latinoamericana de Nutrición.
- [2] Cosme Pérez, I. (2008). *El uso de las plantas medicinales*. Revista Intercultural, Universidad Veracruzana Intercultural, 23-26.
- [3] Londoño Londoño, J. (s.f.). *Antioxidantes: importancia biológica y métodos para medir su actividad*. En Capítulo 9, Investigación en Ingeniería de Alimentos - GRIAL. Corporación Universitaria Lasallista.
- [4] Pastene, E. R. (2009). *Estado actual de la búsqueda de plantas con actividad antioxidante*. Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas, 8(6), 449-455. Universidad de Santiago de Chile. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85617461001>
- [5] Ramos Llica, E., Castañeda Castañeda, B., & Ibáñez Vásquez, L. A. (2008). *Evaluación de la capacidad antioxidante de plantas medicinales peruanas nativas e introducidas*. Revista Académica Peruana de Salud, 15(1), 42-46.

Huygens y la robótica de enjambres

Dr. Luis Moreno Ahedo
Dr. Raúl Rascón

Laboratorio de Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Baja California

Abstract

Christiaan Huygens accidentally discovered, around 1660, the phenomenon of the synchronization of two man-made systems, this isolated discovery went unnoticed for several centuries. However, during the 1990s mathematical biology studied phenomena in nature related to the behavior of flocks, swarms, schools, colonies and herds, seeking to explain these phenomena, concepts of synchronization of systems were developed and Huygens' work was recognized by the community as the pioneer of synchronization. Years later with the rise of mobile robotics, the application of synchronization theories led to the development of swarm robotics as an approach to robotics that draws on the collective intelligence of natural systems and involves the use of multiple robots (called "agents" or "swarms") that work cooperatively in a coordinated manner to perform complex tasks.

Keywords: Synchronization of systems; Swarm robotics; Collective intelligence

Resumen

Christiaan Huygens descubrió accidentalmente, alrededor de 1660, el fenómeno de la sincronización de dos sistemas hechos por el hombre, este sui generis descubrimiento pasó décadas desapercibido. Sin embargo, durante finales de los años 80 la biología matemática estudió ciertos fenómenos de la naturaleza relacionados con el comportamiento de parvadas, enjambres, cardúmenes, colonias y manadas. Buscando explicar estos fenómenos se desarrollaron los principales conceptos sobre la sincronización de sistemas

y el trabajo de Huygens recibió el reconocimiento de la comunidad científica como el pionero de los estudios sobre la sincronización. Años más tarde con el auge de la robótica móvil, la aplicación de las teorías sobre sincronización llevó al desarrollo de la robótica de enjambre como un enfoque en el que la Robótica se inspira en la inteligencia colectiva de sistemas naturales y consiste en el uso de múltiples robots (llamados "agentes" o "swarms") que trabajan cooperativamente de manera coordinada para realizar tareas complejas.

Palabras clave: Sincronización de sistemas; Robótica de enjambre; Inteligencia colectiva.

A primera vista podríamos dar por hecho que el dibujo de la figura 1 fue realizado por una niña o niño (Huygens, 1893). Pero, por más inaudito que parezca, fue hecho por el astrónomo, físico, matemático e inventor holandés Christiaan Huygens contemporáneo de Newton, y un gigante de su tiempo, un retrato de él se muestra en la figura 2.

Huygens inventó y patentó en 1656 el reloj de péndulo mostrado en la figura 3, en una época donde la expansión colonial de las grandes potencias europeas y el mercantilismo forjaban el devenir del Orbe, y donde grandes cambios y conflictos se avizoraban en el horizonte. Durante aquella época medir el tiempo era un imperativo, que, de llegar a buen cauce, garantizaría una ventaja encomiable sobre las naciones en pugna involucradas.

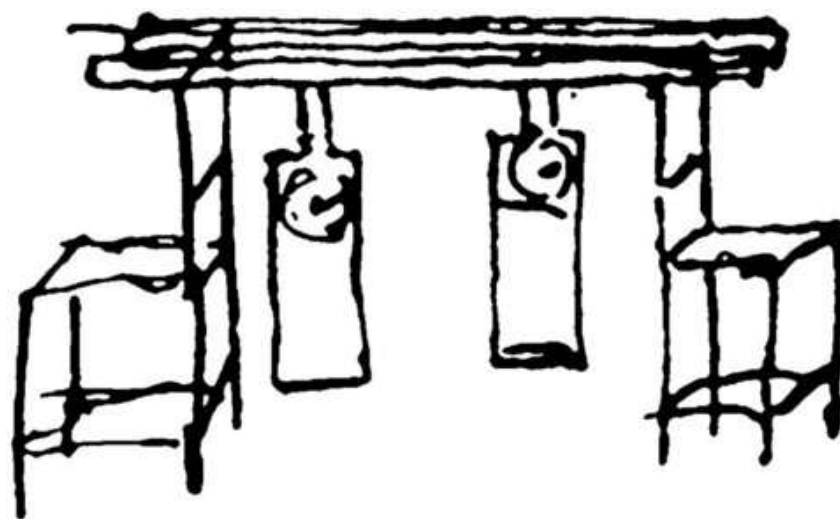


Figura 1: Simpatía de dos péndulos según Christiaan Huygens



Figura 2: Retrato de Christiaan Huygens (1629-1695)

El invento de Huygens fue durante tres siglos la mejor manera de medir el tiempo. Sin embargo, el comercio marítimo planteó un nuevo paradigma, cómo medir el tiempo en los grandes barcos mercantes que surcaban los mares de Oriente a Occidente, y claro a la Nueva España y sus extensos dominios en la América de Colón. Este problema recibió el nombre del Problema de la Longitud. El problema estribaba en determinar la Longitud en el mar (la distancia de este a oeste dado un punto de referencia), este problema fue un asunto medular para la navegación

global de la época, y la medición del tiempo en los barcos fue el reto científico y técnico y por el cual el gobierno británico mediante la Ley de la Longitud instauró un premio con un sustancioso monto monetario, esta épica aventura está narrada en el libro de Sobel (1996). El asunto no era trivial, pues el reloj de péndulo no funcionaba adecuadamente ante los embates de las olas y los vaivenes de los mares. Usando el lenguaje moderno, podemos afirmar que el problema era un problema de sincronización de dos relojes, uno en tierra y el otro colocado en los barcos.

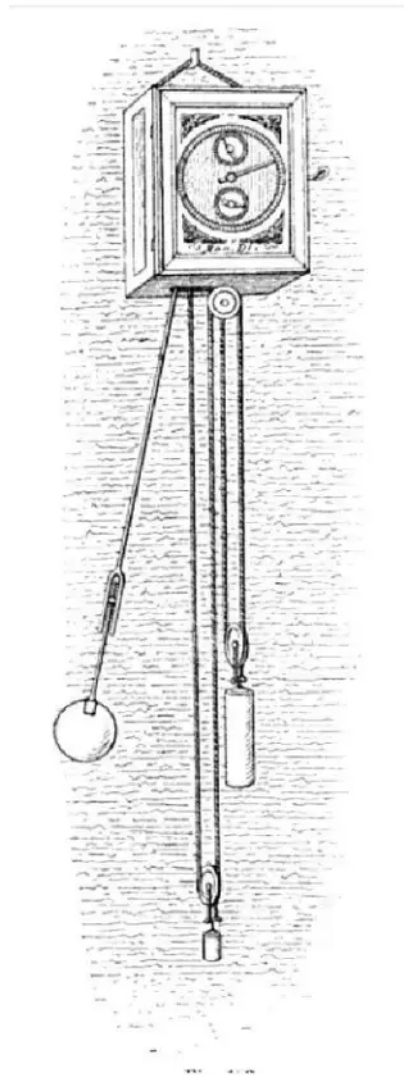
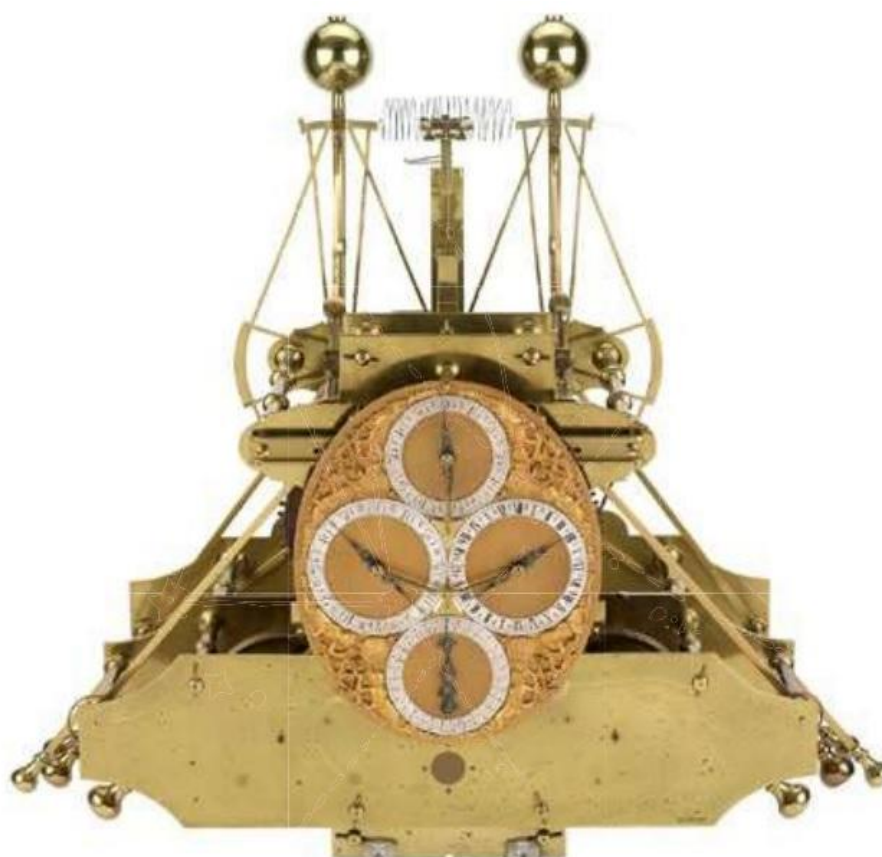


Figura 3: Reloj de péndulo que Huygens inventó.

El problema fue resuelto por el relojero inglés John Harrison con la invención del cronómetro marino en 1761, esto después de décadas de diseño y construcción, su invento se muestra en la figura 4. Durante este impasse, varias aproximaciones a la solución fueron propuestas. Huygens por su parte investigó el problema desde una aproximación empírica, su carácter era más de un emprendedor que un científico en forma. Huygens colgó dos de sus relojes de péndulo a una tabla de madera sostenida por un par de sillas, como muestra el intrigante dibujo arriba mostrado. Hecho esto, Huygens observó un fenómeno sin parangón: los péndulos siempre oscilarán sincrónicamente en direcciones opuestas con respecto de sí mismos sin importar la posición de donde inicien su movimiento pendular.

Huygens perplejo anunció sus hallazgos enviando una carta a la *'Royal Society of London'* relatando en ella este fenómeno nombrándolo como *"sympathy of two pendulum"* o la "simpatía de dos péndulos". Él no pudo más hipotetizar las causas de este fenómeno, pues las herramientas matemáticas del Cálculo estaban en ciernes de ser dadas a conocer por Newton y Leibniz. Huygens sospechaba que los péndulos ejercen algún tipo de fuerza mutua a través de la tabla de madera a la que estaban sostenidos. Sin duda, Huygens fue un personaje simpático, descubrió el fenómeno de la sincronización tendido en su cama mientras convalecía de una enfermedad. Recordemos, estamos en la década de 1660 y la peste negra ensombrecía mórbidamente a gran parte de Europa.



Primer cronómetro marino, H1.

Figura 4: Cronómetro marino de John Harrison inventado en 1761



Figura 5: Ejemplo de comportamientos en enjambres de especies

Desafortunadamente, el descubrimiento de Huygens no suscitó el interés de la comunidad científica de la época, y poco a poco fue relegado por el Problema de la Longitud, pues una guerra comercial y militar por la supremacía marítima se libraba. A este respecto, ¿cuántos fenómenos de ‘simpatía’ pasaron desapercibidos y perdieron la oportunidad de ser estudiados debidamente de manera curiosa e inquisitiva como nuestro simpático Huygens lo hizo?

Por ejemplo, en 1680 el explorador alemán Engelbert Kaempfer durante un viaje a la mítica Siam, hoy Tailandia, observó el centelleo coordinado de

enjambres de luciérnagas posadas en los árboles las cuales titilaban con regularidad y exactitud, ver figura 4. Este centelleo sincronizado fue un misterio científico por muchas décadas, incluso en el siglo pasado este fenómeno no era del todo entendido; por ejemplo, en la revista Science de 1917 un científico escribió «que algo así ocurra entre los insectos es ciertamente contrario a todas las leyes naturales». A decir verdad, este fenómeno no es un hecho aislado y existe una similitud entre el comportamiento de otros agrupamientos de especies animales como parvadas, colonias, cardúmenes y manadas.



Figura 6: Ejemplos de robótica de enjambres

No obstante, aunque incipiente y latente, la idea planteada por Huygens germinará, pues solo bastaban nuevas formas de análisis para ser reconocida como una rama más de la Ciencia llamada Sincronización. “Y nadie echa vino nuevo en odres viejos” escribe Lucas 5:36, así pues, para captar la relevancia de los fenómenos de ‘simpatía’ se necesitó de renovados bríos.

Científicos de diversas latitudes del orbe y disciplinas se abocaron en estudiar fenómenos tan aparentemente disímiles como los péndulos de Huygens, las oscilaciones en los sistemas fisiológicos, el titilar de las luciérnagas, colonias de abejas y hormigas, las redes de neuronas, oscilaciones en reacciones químicas por mencionar algunos casos de estudio,

entre los científicos exponentes de estos exhaustivos estudios encontramos a Glass y Mackey (1988), Winfree (2001), Watts (1999) y Kuramoto (1984) y Strogatz (2006). Dentro de todos estos estudios, colocamos el libro de Strogatz (2006) en primer lugar por ser una fuente inigualable de divulgación e inspiración.

A la par que se desarrollaban los conceptos de sincronización de sistemas que ocurren en la naturaleza, el científico ruso Ilya I. Blekhman, publicó su libro seminal Blekhman (1998), donde establece que “la sincronización juega un papel fundamental en la ciencia y la tecnología...z desarrolló la idea de sincronizar sistemas hechos por

el hombre, entre ellos obviamente se encuentran los robots Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). Un campo activo de investigación es la sincronización de robots móviles, robots manipuladores y vehículos aéreos no tripulados por sus potenciales aplicaciones entre las que destacan:

1. Agricultura de precisión
2. Control de calidad
3. Logística y almacenamiento
4. Manufactura y ensamblaje
5. Búsqueda y rescate en entornos industriales
6. Inspección y mantenimiento

Arquímedes afirmó: "Dadme una palanca y moveré el mundo". De igual manera podemos afirmar que Huygens descubrió un fenómeno para el cual no tuvo explicación alguna en su tiempo, pasarían siglos para que tal extraordinario fenómeno cobraría una relevancia de tal envergadura; que sin menor a dudas podemos afirmar que la idea de Huygens mueve al mundo tal cual se vislumbra hoy en día y proyecta un futuro promisorio, alucinante y fascinante.

Referencias

- [1] Blekhman, I. I. (1988). *Synchronization in science and technology*. ASME Press.
- [2] Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm intelligence: From natural to artificial systems*. Oxford University Press.
- [3] Glass, L., & Mackey, M. C. (1988). *From clocks to chaos: The rhythms of life*. Princeton University Press.
- [4] Huygens, C. (1893). Correspondencia 1664–1665. En M. Nijhoff (Ed.), *Oeuvres complètes de Christiaan Huygens* (Vol. 5). La Societe Hollandaise des Sciences.
- [5] Kuramoto, Y. (1984). *Chemical oscillations, waves, and turbulence*. Springer-Verlag.
- [6] Sobel, D. (1996). *Longitud: La verdadera historia de un genio solitario que resolvió el problema científico más grande de su tiempo*. Editorial Debate.
- [7] Strogatz, S. (2006). *Sincronización: Cómo el orden emerge del caos en el universo, la naturaleza y la vida cotidiana*. Tusquets Editores.
- [8] Watts, D. J. (1999). *Small worlds: The dynamics of networks between order and randomness*. Princeton University Press.
- [9] Winfree, A. T. (2001). *The geometry of biological time* (2nd ed.). Springer.



Bromelias: diversidad, adaptaciones e importancia

Dra. Elizabeth Victoriano Romero

Maestría en Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias
Biológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Dra. Dulce María Figueroa Castro

Laboratorio de Interacciones Ecológicas, Facultad de
Ciencias Biológicas, Benemérita Universidad Autónoma de
Puebla

Abstract

Plants within the Bromeliaceae family have diverse intrinsic traits (anatomical, morphological, physiological) that allow them inhabiting in sites with different environmental conditions. Their distribution includes from arid sites (lacking nutrients and water) to cold sites. Currently, bromeliads are a diverse group distributed in different ecosystems throughout the American continent. Bromeliads have an important contribution to the abundance and diversity of ecosystems; also, they play an important role on nutrient cycling, and are a source of food, shelter, or habitat to diverse organisms. However, they are threatened by different factors, such as habitat fragmentation, climate change, and extraction from their ecosystems for human use. A first step towards bromeliad conservation is knowing their biology and the diversity of adaptations they hold. The goal of this contribution is to provide a general view of the different adaptations they have, where they live, and the diversity of interactions they establish.

Keywords: Bromeliaceae, CAM metabolism, rosettes, trichomes

Resumen

Las plantas de la familia Bromeliaceae presentan diversas características intrínsecas (anatómicas, morfológicas, fisiológicas) que les permiten habitar en sitios con distintas condiciones ambientales, desde sitios áridos y secos (con escasez de nutrientes y agua), hasta sitios fríos. Actualmente, las bromelias son un grupo diverso que se distribuye en varios ecosistemas del continente americano. Las bromelias son elementos importantes en los ecosistemas, por contribuir con la diversidad y abundancia, influir en

los ciclos de nutrientes, y por brindar alimento, refugio o hábitat a diversos organismos. No obstante, se enfrentan a la fragmentación del hábitat, el cambio climático, así como a la extracción de los ecosistemas para uso humano. Un primer paso para conservar a las bromelias es conocerlas. Este trabajo tiene como objetivo mostrar las distintas características que presentan, donde habitan, así como qué interacciones tienen.

Palabras clave: Bromeliaceae, metabolismo CAM, rosetas, tricomas

Introducción

Las especies de la familia Bromeliaceae son plantas herbáceas que pertenecen al grupo de las monocotiledóneas dentro de las angiospermas o plantas con flores y frutos. Las bromelias no son tan ajenas a ti como quizás pienses, ya que todos en algún momento hemos tenido contacto con alguna de ellas. Entre las más conocidas, están la piña (*Ananas comusus*) y la “piñuela” (*Bromelia pinguin*), especies cuyos frutos son consumidos por el humano. Así mismo, el “heno” (*Tillandsia usneoides*) es utilizado comúnmente como parte de las celebraciones navideñas en la temporada decembrina. Otra especie que vemos frecuentemente, es *Tillandsia recurvata*, también conocida como “gallinitas”; que crece y cumple su ciclo de vida sobre los cables de luz. La piña, el heno y las gallinitas son muy distintas entre sí, pero todas pertenecen a la misma familia, ¿qué características generales distinguen a las bromelias?

Por ser plantas monocotiledóneas, las bromelias carecen de tejido leñoso; no presentan una raíz principal, sino muchas raíces similares en tamaño y grosor; sus hojas tienen venación paralela y sus partes florales (por

ejemplo, pétalos, sépalos, estambres) se presentan en múltiplos de tres. Además, las bromelias tienen tallos cortos (poco visibles a simple vista) con un alto contenido de agua (suculentos). Las hojas se insertan alrededor de los tallos formando una roseta (Figura 1A). El margen (borde) de las hojas es variable, pudiendo ser liso o entero, aserrado o incluso espinoso.

Sus raíces generalmente son escasas, fibrosas y rígidas. Las flores de las bromelias son perfectas, esto es, que poseen estructuras reproductivas tanto masculinas como femeninas. Las bromelias producen numerosas flores que se encuentran agrupadas formando inflorescencias, ya sea laterales o terminales (Figura 1B).



Figura 1: Características generales de las bromelias. Crecimiento en forma de roseta de *Tillandsia capitata* (A) y producción de flores agrupadas formando una inflorescencia en *Tillandsia multicaulis* (B).

Las bromelias son un grupo monofilético, esto es, que todas las especies dentro de la familia comparten un ancestro en común (Barfuss *et al.* 2005). En el Neotrópico, Bromeliaceae es una de las cinco familias de angiospermas más diversas, con poco más de 3600 especies, pertenecientes a 78 géneros y ocho subfamilias (Brocchinioideae, Bromelioideae,

Hectioideae, Lindmanioideae, Navioideae, Pitcairnioideae, Puyoideae y Tillandsioideae). De éstas, Bromelioideae (con aproximadamente 800 especies, 22.2% del total de especies de bromelias), Pitcairnioideae (406 especies, 11.3%) y Tillandsioideae (1500 especies, 41.6%), en conjunto, contienen el 75% de las especies de toda la familia. África es el centro de origen de la familia,

misma que posteriormente se dispersó al continente americano, donde las bromelias encontraron condiciones óptimas para establecerse, ampliar su distribución y evolucionar. Hoy en día, *Pitcairnia feliciana* es la única especie que habita África, el resto de las bromelias se distribuye desde el sur de Estados Unidos hasta la Patagonia. Debido a que su distribución está mayormente restringida al continente americano, se considera como una familia endémica de América. Entre los países con mayor diversidad de bromelias está Colombia (391 especies), Ecuador (368 especies), y Perú (410 especies). Además, una gran diversidad y nivel de endemismo (especies cuya distribución está restringida a sitios específicos) de bromelias se presenta en México [(422 especies de bromelias, de las cuales 318 son endémicas (representando el 75.3% del total)], Venezuela [364 especies, 177 endémicas (que representan 48.6% del total)], y Brasil [816 especies, 651 endémicas (representando el 79.9% del total)] (Espejo-Serna *et al.* 2018; Zizka *et al.* 2019).

Las especies de bromelias que se distribuyen en México pertenecen a 19 géneros. Los que comprenden una mayor diversidad de especies en México, son *Pitcairnia* (11.8% de las especies), *Hechtia* (16.8% de las especies) y *Tillandsia* (54.5% de las especies). Éste último género tiene un alto número de endemismos en México (144 especies, 62.6% de las especies del género). Los estados de la República que albergan la mayor riqueza de bromelias son Oaxaca con 139 especies (32.93% del total de especies en México), Chiapas con 126 especies (29.85%), Veracruz con 91 especies (21.56%), Guerrero con 88 especies (20.85%), Jalisco con 72 especies (17%) y Puebla con 58

especies (13.74%). De estos, Oaxaca y Guerrero presentan el más alto porcentaje de endemismos (28.4% y 23.9% de las especies totales de México, respectivamente) (Espejo-Serna *et al.* 2018).

Las bromelias habitan en una gran variedad de ecosistemas, tales como bosque siempre verde, bosque de niebla, bosque seco, matorral, pastizal y sabana. Además, pueden establecerse y cumplir su ciclo de vida sobre una amplia variedad de sustratos (troncos, rocas, cables de luz, tejas de barro). De acuerdo con el tipo de sustrato en el que se establecen, se distinguen tres hábitos de vida principales: i) terrestre (plantas que crecen y se desarrollan ancladas al suelo), ii) litófito, también conocido como saxícola o rupícola (plantas que viven sobre afloramientos rocosos o en acantilados) y, iii) epífita (plantas que usan como soporte otras plantas sin parasitarlas). De estos hábitos, el epífita es el más común, estando presente en el 59% de las especies de bromelias. No obstante, aunque algunas especies tienen un solo hábito (la piña, *Ananas comosus*, es terrestre; *Tillandsia recurvata* es epífita), otras especies pueden establecerse en dos tipos de sustratos (*Aechmea nudicaulis* es epífita y rupícola, *Aechmea lamarchei* es terrestre y epífita) o incluso presentar los tres hábitos (*Aechmea distichantha*).

Las variadas adaptaciones (anatómicas, morfológicas y fisiológicas) de sus especies ha permitido una alta y rápida diversificación de esta familia. En conjunto, esas adaptaciones les permiten establecerse y enfrentar distintas condiciones ambientales, por lo que pueden habitar en una gran variedad de sustratos y hábitats.

Adaptaciones de las Bromelias ante diferentes condiciones ambientales*Alta temperatura, radiación solar y estrés hídrico.*

En sitios áridos o semiáridos, donde la escasez de agua es constante (*i.e.*, pastizales, matorrales, desiertos, bosque seco y/o en la copa de los árboles o sobre sustratos completamente expuestos a la radiación solar), las bromelias han desarrollado características que les permiten resistir a la desecación y evitar la pérdida de agua. Estas características son anatómicas, morfológicas y fisiológicas. Entre las características anatómicas se encuentra el desarrollo de cutículas engrosadas, estomas (estructuras de intercambio gaseoso en las plantas) hundidos, tejidos suculentos, hipodermis y tricomas. La cutícula es una capa de ceras (compuesta principalmente de lípidos) que recubre toda la superficie de las plantas. Entre sus funciones se encuentra evitar la incidencia directa de radiación solar sobre los tejidos vegetales y la pérdida de agua por transpiración (pérdida de agua en forma de vapor desde los tejidos internos de la planta). Así mismo, la cutícula confiere cierta impermeabilidad a las plantas. De esta manera, una cutícula de mayor grosor es ventajosa en ambientes con una alta incidencia de luz y temperaturas altas, ya que evita que la planta pierda agua. Algunas bromelias que presentan una cutícula gruesa son *Aechmea aguilera*, *Bromelia karatas*, *Tillandsia makoyana*.

Otra adaptación anatómica que presentan las bromelias son los estomas hundidos, los cuales se ubican hacia el interior de la epidermis. Este tipo de estomas amortigua las condiciones ambientales de alta temperatura y radiación solar, y es un mecanismo eficiente de conservación de agua en los tejidos de la planta. Por lo anterior, las

bromelias con estomas hundidos pueden habitar en sitios secos (bosque seco, matorrales) y/o las copas de los árboles expuestas directamente a la radiación solar y a altas temperaturas. Algunas bromelias con estomas hundidos son *Aechmea bracteata*, *Bromelia pinguin*, *Guzmania monostachia* y *Quesnelia augusta-coburgii*. Otra característica de las bromelias que crecen expuestas a condiciones ambientales secas es la disminución en la densidad de estomas. De esta forma, se evita la pérdida de agua. Entre las especies de bromelias que tienen una baja densidad de estomas se encuentran *Tillandsia recurvata* y *T. schiedeana*.

El tejido suculento (también denominado parénquima acuífero) tiene la función de almacenar agua en los tejidos internos de la planta, que usará durante los periodos de sequía. En las bromelias, la suculencia se presenta en cinco de las ocho subfamilias. Los géneros con el mayor número de especies suculentas son *Hechtia* (Hechtioideae), *Deuterocochnia*, *Dyckia*, *Encholirium* (Pitcairnioideae) y *Puya* (Puyoideae). Los tejidos suculentos se presentan tanto en hojas como en tallos. En el caso de las hojas, hasta el 85% del volumen de la hoja almacena agua. En las hojas de las bromelias, el grado de suculencia puede ser homogéneo (suculencia por igual en ambas caras, como en *B. tubulosa* y *B. scarlatina*) o heterogéneo. Por ejemplo, algunas especies tienen mayor suculencia en el envés de la hoja (*Bromelia morreniana*), mientras que otras en el haz (*Pitcairnia albiflos*, *P. heterophylla*). En cuanto a la suculencia en tallos, las bromelias del género *Puya* (*P. andina* y *P. raimondii*) presentan tallos que alcanzan hasta 4 metros de altura y hasta un metro de diámetro. Por otra parte, en sitios donde la precipitación es escasa, los

tallos almacenan agua rápidamente durante la temporada de lluvias, que puede ser utilizada durante el periodo de sequía. *Hechtia podantha*, *Dickya marnier-lapostollei*, *Guzmania lingulata*, y *G. monostachia* son especies de bromelias en las que se presenta este fenómeno. Aunado a la succulencia, en hábitats secos y con periodos de lluvia cortos, las bromelias pueden desarrollar una hipodermis en las hojas. Este es un tejido que consta de una o varias capas de células que se forman por debajo de la epidermis y por encima del tejido succulento. La hipodermis amortigua los cambios en el contenido de agua en los tejidos internos de las bromelias entre periodos de abundancia y escasez de agua. Ejemplos de especies que presentan hipodermis son *Aechmea bromeliifolia*, *Ananas bracteatus*, *Bilbergia nutans*, *Bromelia balansae*, *Tillandsia recurvata*, y *T. tricholepis*, entre otras.

Alrededor del 80% de las bromelias (2885 especies) presentan tricomas (*trichos* significa pelo) especializados en sus hojas. Estos tricomas se encuentran adheridos a la epidermis de las hojas y varían en su forma, pudiendo tener forma de estrella, de paraguas (llamados peltados), y con alas. En ocasiones se presentan varios tipos de tricomas en una misma hoja. Entre las funciones que desempeñan los tricomas, se encuentran las de protección y de absorción. En el caso de la función de protección, los tricomas presentan una coloración grisácea y/o plateada que permite reflejar los rayos de luz y evita el sobrecalentamiento de los tejidos internos de las hojas. De esta manera, una alta densidad de tricomas resulta particularmente favorable en hábitats en los que las bromelias están expuestas a la radiación solar directa. Respecto a la función de absorción, los tricomas presentes en plantas de la familia

Bromeliaceae se especializaron para poder obtener humedad directamente de la atmósfera, lo cual les confiere ventajas en ambientes donde el agua es un recurso limitante. En general, tanto los tricomas de protección como los de absorción se presentan en bromelias de cualquier hábito (terrestres, litófitas y epífitas).

En cuanto a características morfológicas, se encuentra la forma de las rosetas (Figura 1A), distinguiéndose tres tipos, en forma de tanque (Figura 2), nebulofitas (Figura 3A y 3B) y pseudobulbosas (Figura 3C). Aunque los tres tipos de rosetas tienen un papel central en la conservación del agua, cada una de las tres tiene mecanismos distintos para lograrlo. Las rosetas tipo tanque se caracterizan porque la disposición circular de sus hojas deja espacios o cavidades en el centro de la planta, donde el agua puede ser retenida (Figura 2). En las plantas, cualquier cavidad que tenga la capacidad de retener agua se conoce como “fitotelma”; término proveniente del griego *phyto* que se refiere a planta y *telma* que significa estanque. Las bromelias tanque pueden encontrarse tanto en sitios húmedos como en sitios áridos. Es en estos últimos, el tanque es una adaptación eficaz para la retención del agua de lluvia por cierto periodo de tiempo; misma que puede emplear cuando así lo requiera. Alrededor del 55% de las especies de bromelias presentan rosetas tipo tanque. Este tipo de roseta no es exclusivo de un género o hábito de vida, por lo que tanto especies terrestres, como litófitas y epífitas pueden presentarlo. El tamaño del tanque y la cantidad de agua almacenada en su interior varía entre especies de bromelias. Los tanques más pequeños almacenan entre 0.02 y 0.60 litros de agua, mientras que los más profundos pueden llegar a almacenar hasta 5 litros de agua.

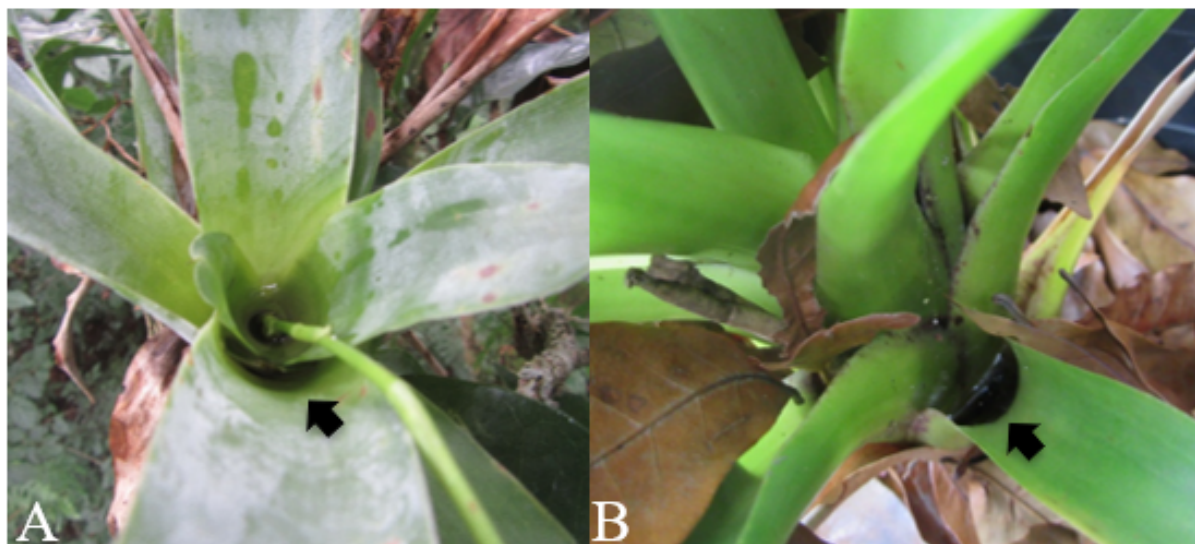


Figura 2: Bromelias tipo tanque. Las flechas negras señalan las cavidades donde se distingue el agua retenida en la roseta tanque de (A) *Catopsis sessiliflora*, y (B) *Tillandsia multicaulis*.

Las rosetas de tipo nebulofita (igualmente conocidas como atmosféricas) también son adaptaciones para enfrentar la aridez y el estrés hídrico. El término nebulofita proviene de los vocablos nebulosa que significa “niebla” y *phyto* que refiere a “planta”. Por lo tanto, una planta nebulofita es aquella capaz de interceptar la niebla. Las bromelias nebulofitas presentan un gran número de hojas alargadas y delgadas (similares a las hojas de algunos agaves y yucas, que también son nebulofitas), con poca o moderada succulencia, y con presencia de tricomas (Figura 3). La interceptación de gotas de niebla se da a través de la coalición de corrientes de viento entre las numerosas hojas delgadas y estrechas de las bromelias, donde los tricomas se encargan de absorber el agua. Las bromelias nebulofitas pueden encontrarse en distintos tipos de bosques (bosques siempre verdes, bosques de niebla, bosques fríos, bosques secos). No obstante, son más frecuentes en

sitios con lluvias escasas, donde la interceptación de neblina es crucial para que la planta obtenga agua. *Tillandsia* es el género de bromelias con el mayor número de especies nebulofitas. Algunos ejemplos son *Tillandsia ionantha*, *T. juncea* (Figura 3A), *T. recurvata* y *T. schiedeana* (Figura 3B).

Por otro lado, las bromelias pseudobulbosas se caracterizan por presentar en la base de la roseta cavidades que se originan del enrollamiento de las hojas (hojas involutas), dando una apariencia “globosa” en la base de las hojas succulentas. Las bromelias pseudobulbosas presentan tricomas que favorecen la absorción de agua a través de la superficie de las hojas, y la almacenan en los tejidos succulentos de las hojas, para usarse en los periodos de sequía. Algunas especies pseudobulbosas son *Tillandsia bulbosa*, *T. butzii*, *T. pauciflora* y *T. caput-medusae* (Figura 3C).



Figura 3: Ejemplos de bromelias con distintos tipos de roseta. *Tillandsia juncea* (A), y *T. schiedeana* (B) son bromelias epífitas de tipo nebulofito, mientras que *T. caput-medusae* (C) es de tipo pseudobulboso.

Por último, entre las características fisiológicas que permiten a las plantas sobrevivir ante condiciones de sequía y de alta radiación solar, se encuentra el metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM, por sus siglas en inglés). Alrededor del 60% de las especies de bromelias lo presentan. Las plantas con este tipo de metabolismo abren sus estomas y llevan a cabo el intercambio gaseoso durante la noche. De esta manera, evitan la pérdida de agua que conllevaría la apertura estomática durante el día, cuando la temperatura es alta y la radiación solar incide directamente sobre los tejidos fotosintéticos. El dióxido de carbono capturado durante la noche se almacena en forma de ácido málico y, al día siguiente es transformado a través del proceso fotosintético. El metabolismo CAM se desarrolló de manera independiente en distintos grupos de bromelias y no está asociado a algún hábito de crecimiento (terrestres, litófitas y epífitas) en particular. Esta característica fisiológica no se encuentra entre las especies de bromelias más primitivas, por lo que es que es una adaptación clave en grupos más recientes que permitió la alta diversificación de la familia. En consecuencia, al ser una vía fotosintética eficiente en el uso del agua permitió que las bromelias pudieran habitar en condiciones ambientales caracterizadas por una estacionalidad marcada, con gran aridez o con alta exposición a la radiación solar. Actualmente, los géneros *Hechtia* y *Tillandsia* son los que presentan una mayor proporción de especies con metabolismo CAM (100% y 60% de las especies, respectivamente). Las especies de estos géneros habitan

mayormente en sitios directamente expuestos a altos niveles de radiación solar, como bosques secos o sobre acantilados (bromelias del género *Hechtia*), así como sobre las copas de los árboles (especies del género *Tillandsia*).

Escasez de nutrientes.

La diversificación de la familia de Bromeliaceae ocasionó la evolución de distintas adaptaciones morfoanatómicas entre las especies de bromelias para la obtención de nutrientes. Esto ha favorecido la ampliación de su distribución geográfica, permitiéndoles colonizar sitios con escasez de nutrientes (sitios áridos y secos como bosques caducifolios, matorrales, copas de los árboles, bloques de rocas). De manera general, se reconocen dos adaptaciones importantes para la obtención de nutrientes, una de tipo anatómico (tricomas en las hojas) y otra de tipo morfológico (rosetas tipo tanque).

En algunas especies de bromelias la fuente principal de obtención de nutrientes es a través de los tricomas foliares. Los tricomas en las hojas de las bromelias absorben los nutrientes directamente de la atmósfera. Este proceso inicia con la deposición de los nutrientes minerales en seco sobre la superficie foliar gracias a la acción de las corrientes de viento; y, posteriormente, cuando las hojas se humectan por la caída de lluvia o la presencia de niebla en el ambiente, los minerales se disuelven en el agua y son absorbidos a través de los tricomas. Ejemplos de bromelias que obtienen nutrientes mediante tricomas absorbentes son *Tillandsia juncea* (Figura 3A), *T. usneoides*, y *T. recurvata*, todas de hábito epífita. Estas bromelias epífitas se encuentran en un ambiente con constante falta de nutrientes (porque

sus raíces no participan en la absorción y solo cumplen la función de anclaje), por lo que los tricomas foliares son su única fuente de obtención de nutrientes. Por otra parte, en especies de bromelias en forma de tanque, la materia orgánica vegetal (proveniente de la caída de hojas y ramas de otras plantas) y animal (invertebrados que cumplen su ciclo de vida y mueren dentro de la roseta) se acumula en el interior de la roseta. Esa materia orgánica entra en proceso de descomposición dentro del tanque de la bromelia, de tal manera que los nutrientes quedan disponibles y pueden ser absorbidos por los tricomas que están presentes en la superficie de las hojas y las zonas donde se unen las hojas y los tallos. Esta forma de absorción de nutrientes mediante el tanque es importante en bromelias de hábito epífita y litófito. *Guzmania monostachia* (epífita), *Vriesea minarum* (litófito) *Tillandsia fasciculata* (epífita), y *T. lenca* (litófito) son algunos ejemplos de bromelias con absorción de nutrientes mediante el tanque. Por último, existen bromelias que pueden presentar de manera conjunta las dos características ya mencionadas (tricomas foliares y rosetas tipo tanque). En conjunto, ambas características hacen más eficiente la adquisición de nutrientes. Tal es el caso de especies como *Aechmea nudicaulis* (hábito epífita y litófito), y *Tillandsia makoyana* (hábito epífita).

Baja temperatura.

Aunque las bromelias se distribuyen mayormente en climas tropicales y cálidos, algunas especies, como las del género *Puya* (que comprende poco más de 200 especies) se distribuyen en regiones con altitudes por encima de los 3000 o 3500 m snm. Entre las condiciones ambientales imperantes en estos sitios de mayor altitud

se encuentra la caída de nieve, temperaturas promedio de entre 3.7°C y 19.4°C, y exposición a una alta radiación solar ocasionada por la baja frecuencia de nubes y la acción constante del viento. Para enfrentar estas condiciones, las bromelias han desarrollado adaptaciones morfológicas (como las hojas marcescentes, es decir, hojas muertas y persistentes en la planta), así como anatómicas (tricomas e hipodermis) para soportar el ambiente gélido.

Las hojas marcescentes son una adaptación morfológica que da a las bromelias un aspecto robusto (dando la apariencia de una “falda”) y protector. Esto se debe a que una vez que las hojas mueren, se quedan adheridas alrededor del tallo, aislándolo de la alta radiación solar y del impacto de los vientos, a la vez que lo protegen de las bajas temperaturas durante la noche. Algunas especies del género *Puya* con presencia de hojas marcescentes son *P. goudotiana*, *P. raimondii*, y *P. rahuii*. Por otra parte, algunas especies de bromelias que se distribuyen en zonas con bajas temperaturas y altas elevaciones presentan una alta densidad de tricomas en los tallos que sostienen las flores, aislándolos de las bajas temperaturas y proporcionando la temperatura óptima para la maduración de las estructuras reproductivas. En Ecuador, se realizó un experimento en el que se removieron los tricomas y se midió la temperatura del tallo de las especies *P. hamata*, y *P. clava-herculis*. En ese experimento se encontró que una vez que los tricomas eran removidos, los tejidos de la planta tenían 4°C menos en comparación con los tallos que mantenían los tricomas intactos. Otra adaptación de las bromelias a sitios con gran altitud y condiciones frías, es la hipodermis. Este tejido al

encontrarse bajo la epidermis protege a los tejidos internos de la planta de las variaciones de temperatura. Durante el día, la hipodermis evita los efectos de la radiación solar directa sobre los tejidos internos de las hojas; mientras que en la noche es una barrera de aislamiento de antes las temperaturas bajas, como en *P. raimondii*.

Papel ecológico de las bromelias en los ecosistemas

Las bromelias son elementos importantes en los ecosistemas por proveer refugio, hábitat, alimento y agua a otros organismos, lo que contribuye al mantenimiento de las poblaciones de un gran número de especies. Por ejemplo, *Aechmea distichantha* es una bromelia tipo tanque que interactúa con hasta 347 especies de animales y presenta hasta 495 asociaciones con distintos organismos. El 60% de las especies de animales que interactúan con ella la usan como hábitat o refugio; el 35% como fuente de alimento (consumiendo sus hojas, tallos, frutos y el néctar de sus flores); y el 4% de sus interactuantes la emplean como sitio de anidamiento (Freire *et al.* 2021). En México y en Estados Unidos, *Tillandsia usneoides*, comúnmente conocida como heno, es usada como refugio migratorio y de hibernación por distintas especies de murciélagos del género *Lasiurus*. Esta bromelia les brinda protección contra la lluvia y contra sus depredadores, así como un sitio seguro y una temperatura adecuada para sus crías.

Entre los organismos que interactúan con las bromelias destacan bacterias, hongos, algas, helmintos, insectos (abejas, cucarachas, escarabajos, hormigas, y mariposas, entre otros), arañas, ranas, salamandras, serpientes, aves, así como mamíferos (ardillas, murciélagos y monos). Los insectos

son el grupo de invertebrados con los que las bromelias establecen una mayor diversidad de interacciones. Las hormigas sostienen interacciones mirmecófilas (asociación especializada benéfica tanto para la planta como para las hormigas) con las bromelias. Por ejemplo, las bromelias *Aechmea martensii*, *A. tillandsioides*, y *Tillandsia caput-medusae* ofrecen hábitat (entre sus raíces u hojas) y/o alimento (néctar, semillas) a hormigas de los géneros *Azteca*, *Camponotus* y *Crematogaster*, las cuales defienden a las bromelias de sus depredadores y, a través de sus desechos orgánicos, les proveen de nutrientes.

La dispersión de semillas y la polinización, dos procesos ecológicos cruciales en la dinámica de los ecosistemas, son ejemplo de otras interacciones importantes entre insectos y bromelias. En México, las hormigas *Azteca gnava* dispersan las semillas de la bromelia *Aechmea tillandsioides*. Por otra parte, las flores de las bromelias son de colores vistosos (rosa, rojo, anaranjado, morado, amarillo, azul), y producen néctar con una alta concentración de azúcar, por lo que son atractivas para los polinizadores diurnos, entre los que figuran colibríes, abejas, y mariposas. Las bromelias *Hechtia matudae*, *Tillandsia ionantha* y *T. capitata* son polinizadas por estos grupos de insectos. No obstante, algunas bromelias abren sus flores durante la noche, por lo que son polinizadas por animales de hábitos nocturnos como los murciélagos. Estas bromelias suelen tener flores de color blanco, crema o verde, con forma de tubo, campana, o cepillo y producen abundante néctar. Algunos ejemplos de bromelias polinizadas por murciélagos son *Werauhia noctiflorens*, *W. gladioliflora*, *Pitcairnia albiflos* y *Tillandsia viridiflora*.

Las bromelias tipo tanque tienen un papel central como reservorio de agua (pueden almacenar hasta 5 litros), por lo que llegan a establecer interacciones especializadas con algunos animales. Por ejemplo, las ranas *Bromeliohyla bromeliacia* y *Scinax alcatraz* dejan sus huevecillos en los tanques de las bromelias y ahí mismo se desarrollan sus larvas. De manera similar, la salamandra *Bolitoglossa engelhardti* y los escarabajos buceadores del género *Copelatus* utilizan el tanque de las bromelias como su hábitat (Ruano-Fajardo *et al.* 2014; Hájek *et al.* 2023). Otra interacción importante que establecen las bromelias tipo tanque es con bacterias y helmintos. Estos organismos participan en la descomposición de la materia orgánica que se encuentra en el tanque, proceso a partir del cual quedan disponibles nutrientes como nitrógeno y fósforo, que son aprovechados tanto por los microorganismos que viven en el fitotelma como por las bromelias.

Adicionalmente, la alta cantidad de bromelias en los sitios donde se encuentran puede contribuir de distintas formas a los ecosistemas. Un ejemplo de ello es que las bromelias epífitas pueden amortiguar las condiciones microclimáticas de la copa de los árboles en el que se encuentran creciendo. Esto se ha reportado en sitios desérticos de Sudamérica (Chile y Perú), donde la presencia de un gran número de plantas del género *Tillandsia* genera un ambiente más fresco que cuando están ausentes estas plantas. Por otra parte, la alta cantidad de bromelias que puede haber en los bosques (por ejemplo, 0.9 ton/0.1ha de cinco especies de bromelias en un bosque nublado en Colombia y 0.4 ton/ha de *Tillandsia recurvata* en un matorral desértico de México) resalta la importancia que tienen como

productores primarios dentro del bosque. En este sentido, la alta cantidad de materia orgánica que representan las bromelias en los bosques las convierte en un elemento central en el flujo de nutrientes de los ecosistemas donde habitan. Se ha documentado que las bromelias epífitas pueden contener entre 21 % y 43 % de los nutrientes (potasio, nitrógeno y fósforo) de la biomasa foliar total del bosque. Cuando las bromelias epífitas mueren y caen al suelo del bosque, los nutrientes contenidos en sus cuerpos son reintegrados al flujo de nutrientes en los ecosistemas.

En resumen, las bromelias tienen un papel ecológico importante a diversas escalas en los ecosistemas naturales, desde interacciones con microorganismos hasta su intervención en el flujo de energía, y los ciclos biogeoquímicos que ocurren en los ecosistemas.

Las bromelias como recurso para el humano

Alrededor del 2.1% de las bromelias (78 especies) son aprovechadas en al menos 19 países de América latina (Hornung-Leoni 2011). Entre los principales fines para los que el humano emplea a las bromelias se encuentra el alimenticio, el textil, el medicinal, como bioindicadores, de uso ornamental, o en prácticas tradicionales, entre otras.

En cuanto a su importancia alimenticia, alrededor de 24 especies de bromelias son consumidas por el humano (Hornung-Leoni 2011). Entre ellas, figuran las bromelias chak salbay (*Bromelia alsodes*), maya (*B. chrysantha*), timbiriche (*B. hemisphaerica*), y magueycito (*Hechtia montana*), cuyos frutos, ya sea frescos o procesados (como bebidas, condimentos y/o en conservas) son consumidos,

tanto en México como en otras partes del mundo. Los frutos de la piña (*Ananas comosus*), la piñuela (*Bromelia pinguin*) y el aguama (*B. karatas*) son valorados por su alto contenido de minerales (calcio, potasio, fósforo, magnesio y manganeso), vitaminas (C; ácido ascórbico) y antioxidantes (taninos y flavonoides). De éstas, la piña ocupa el tercer sitio en importancia entre las frutas tropicales cultivadas a nivel mundial, registrándose hasta 25.4 millones de toneladas de producción del fruto alrededor del planeta, lo que representa ganancias de hasta 2.5 billones de dólares estadounidenses al año (Li *et al.* 2022). México figura entre los primeros diez países productores de piña, cultivándose en 19 estados de la República. En 2019 se sembraron 22,585 ha de piña en el sureste del país (SIAP 2020).

Referente a la industria textil, las fibras de las bromelias se emplean para la producción de diversos artículos de uso diario. Al menos 19 especies de bromelias son utilizadas para la obtención de fibras, las cuales, son extraídas principalmente de los tejidos de conducción (haces vasculares) de las hojas. Principalmente, son utilizadas para hacer cordeles y/o hilos para las cañas de pescar, así como para la elaboración de hamacas, sogas, cinturones, ropa, sombreros y cestos. Entre los países que hacen mayor uso textil de las bromelias se encuentra Brasil, Bolivia, Chile, Ecuador, Venezuela y México. Algunas especies utilizadas con fines textiles son *Ananas comosus*, *Aechmea bracteata*, *A. magdalenae* y *Bromelia serra*. En México, la especie más usada con estos fines es *Bromelia pinguin*.

Respecto a su uso medicinal, en 13 países de América Latina se ha

documentado el uso de al menos 20 especies de bromelias. Los principales usos de las bromelias son como antihelmínticos, antimicrobianos y digestivos. Por ejemplo, hoy en día se comercializa la “bromelina” que contiene una enzima (proteína que acelera las reacciones químicas en los seres vivos) obtenida de la piña, que es capaz de desintegrar las proteínas en aminoácidos para facilitar su asimilación y absorción. Por esta razón en países como México, la carne al pastor se acompaña con piña para facilitar la digestión. Además de los beneficios contra los trastornos digestivos que tiene la bromelina, también se le atribuye mejorar la circulación sanguínea y prevenir lesiones musculares. Otros usos medicinales que se le atribuyen de manera general a las bromelias, son como antitumorales, antiinflamatorios, citotóxicos, e hipoglucemiantes, así como contra enfermedades del sistema respiratorio y urinario. Las partes usadas con estos fines varían entre especies de bromelias, pudiendo usarse las raíces, los tallos, las hojas, los frutos o una mezcla de varias de esas partes.

Algunas bromelias del tipo nebulofito se han utilizado como bioindicadores de contaminación en áreas urbanas e industriales. Se ha demostrado que los tricomas de las bromelias del género *Tillandsia* pueden absorber directamente de la atmósfera elementos como plomo, zinc, cobre, hierro, níquel, y cobalto. Dado que estos elementos se fijan en los tejidos de las bromelias, son utilizadas para monitorear el nivel de contaminación del aire por estos metales. Algunos ejemplos de las plantas que se han utilizado con estos fines son *Tillandsia aeranthos*, *T. capillaris*, *T. usneoides*, y *T. recurvata*.

A nivel mundial las bromelias son

valoradas por su uso ornamental. Se comercializan (tanto especies silvestres como ejemplares cultivados e incluso híbridos) plantas pequeñas no reproductivas, plantas reproductivas, o sólo las inflorescencias. En América Latina, al menos 12 especies de bromelias son usadas comúnmente como ornamentales en restaurantes, hoteles, parques, así como en casas particulares. Por ejemplo, las bromelias de los géneros *Aechmea*, *Guzmania*, *Puya*, *Tillandsia* y *Werauhia* son comúnmente usadas como ornamento por los colores verde intenso, moteado (Figura 4A) y grisáceo de sus hojas, o por sus inflorescencias de colores rojos, rosas, morados y anaranjados. En los últimos años se ha incrementado la apreciación estética y ornamental de las bromelias epífitas, sobre todo las del género *Tillandsia*. Estas bromelias han sido comercializadas como plantas aéreas o colgantes, incluso son denominadas “claveles del aire”.

Con relación al uso de las bromelias en prácticas tradicionales, se ha reportado que 33 especies se emplean en la vida diaria y/o en ceremonias, cinco especies son utilizadas en cercas vivas y dos especies como combustible. Además, algunas especies se emplean como forraje y las hojas de *Tillandsia ionochroma* se utilizan como silbatos para entretenimiento de los niños. Plantas completas (rosetas e inflorescencias) de *T. religiosa* y *T. usneoides* (heno) se usan como base y adorno en los pesebres de los nacimientos navideños. El heno es muy empleado en las festividades navideñas, por lo que es común su venta en los mercados locales de América Latina. Actualmente, ya existen algunas empresas que cultivan el heno para su comercialización; no obstante, la mayor parte de las plantas que se comercializan

se extraen directamente de los bosques, generando un declive de sus poblaciones. Otro uso tradicional se da a nivel local, donde son utilizadas como adornos temporales; por ejemplo, se extraen las rosetas de plantas completas para adornar arcos en la entrada principal de casas particulares (Figura 4B). Así mismo, las inflorescencias de algunas bromelias son utilizadas para adornar los arcos de iglesias y capillas (Figura 4C) en el Estado de Veracruz; llegando

a emplearse en alrededor de 80 arcos florales al año. En un solo arco de este tipo se llegan a usar hasta 1623 inflorescencias de la epífita *Tillandsia multicaulis*. Un ejemplo similar ocurre en el Estado de Hidalgo, donde plantas completas de *Tillandsia imperiabilis* (endémica de México) y *T. deppeana* son utilizadas para adornar los altares de las iglesias durante las fiestas patronales de semana santa (Hornung-Leoni 2011).



Figura 4: Ejemplos del uso de las bromelias con fines ornamentales. En (A) por su coloración moteada, en (B) se muestran rosetas completas (indicado con la flecha negra) adornando la entrada de una casa y en (C) se muestra el uso de bromelias completas con inflorescencia (indicado con la flecha negra) adornando el arco de una capilla católica.

Por su parte, en países como Perú y Ecuador, las bromelias se utilizan comúnmente en sustitución del carbón, ya sea para calentar los hogares y/o los alimentos o como antorchas. Por ejemplo, las hojas, los tallos principales y los que sostienen la inflorescencia de plantas

de las especies *Puya werberbaerii* y *P. raimondii* se utilizan con estos fines. Un ejemplo similar ocurre en el altiplano peruano, donde el tallo de la inflorescencia de la especie *Puya raimondii* se utiliza como antorcha para alumbrar caminos en las procesiones

nocturnas de las fiestas de las cruces en el mes de mayo. Por otra parte, en diferentes países de América Latina, algunas especies de bromelias también se utilizan como cercos vivos. Por ejemplo, plantas completas del género *Bromelia* se usan para hacer cercas de corrales y delimitar patios. En México, los tallos de las inflorescencias de *Hechtia* gallineros se ocupan para delimitar gallineros. Por otro lado, las hojas jóvenes o las plantas completas de 21 especies de bromelias son utilizadas como alimento para vacas, borregos, puercos, y cuyos. Por último, los niños quechuas de Perú usan las hojas enrolladas de *Tillandsia ionochroma* (conocida como “huicunto”) para crear silbatos.

Entre los nombres comunes que se les da a las bromelias se encuentran “gallitos”, “magueyitos”, “piñuelas”, “tenchos” y “tekolumates”. El uso antrópico de las bromelias no se limita a América Latina, para algunas especies su importancia se extiende a nivel mundial. No obstante, el uso intensivo de distintas especies de bromelias puede tener un impacto negativo en sus poblaciones naturales.

Conclusión

Las diferentes características anatómicas (cutículas gruesas, tejidos suculentos, hipodermis, tricomas, estomas hundidos), morfológicas (rosetas tipo tanque, nebulofitas, pseudobulbosas, hojas marcescentes), y fisiológicas (metabolismo CAM) que presentan las bromelias son un reflejo de la alta diversidad que tienen esta familia. Las diversas adaptaciones presentes en las bromelias han favorecido la conquista de nuevos hábitats (desde bosques secos hasta húmedos y fríos) y la ampliación de su distribución. Gracias a las adaptaciones que presentan es posible encontrarlas sobre distintos sustratos

(suelos, otras plantas, rocas o cables de luz) y en sitios con diversas condiciones ambientales, incluyendo aquellas con escasez de nutrientes, con alta exposición a la radiación solar, y altas o bajas temperaturas. Las bromelias son un elemento importante en los ecosistemas en donde se encuentran, ya que establecen interacciones con animales, plantas, hongos, y bacterias. Pese a esta importancia, existen diversos factores que las ponen en riesgo. Entre los principales factores que afectan a las bromelias se encuentra la fragmentación de los ecosistemas, la invasión de especies, el cambio climático, y la extracción desmedida de plantas completas y/o inflorescencias. En conjunto, estos factores ocasionan la disminución de las poblaciones de muchas especies, llegando a poner en riesgo de extinción no solo a las bromelias, sino también a los organismos con los que interactúan. Actualmente, poco más de 200 especies de bromelias se encuentran en alguna categoría de riesgo (IUCN 2024). Por ello, es necesario conocer a las bromelias y entender los factores que las amenazan para evitar la pérdida de estas interesantes plantas. Asimismo, es necesario comprender y difundir la importancia de las bromelias en los ecosistemas y en nuestra vida diaria, así como generar programas de manejo y regular su explotación en los ecosistemas naturales, para así garantizar su conservación.

Referencias

- [1] Barfuss, M. H., Samuel, R., Till, W., y Stuessy, T. F., Phylogenetic relationships in subfamily Tillandsioideae (Bromeliaceae) based on DNA sequence data from seven plastid regions. American

- Journal of Botany, 92[2], pp. 337-351, 2005.
- [2] Espejo-Serna, A., y López-Ferrari, A. R., La familia Bromeliaceae en México. Botanical Sciences, 96[3], pp. 533-554, 2018.
- [3] Freire, R. M., Montero, G. A., Vesprini, J. L., y Barberis, I. M., Review of the interactions of an ecological keystone species, *Aechmea distichantha* Lem. (Bromeliaceae), with the associated fauna. Journal of Natural History, 55[5-6], pp. 283-303, 2021.
- [4] Hájek, J., Alarie, Y., Benetti, C. J., Hamada, N., Springer, M., Hendrich, L., Villastrigo, A., Ospina-Torres, R., Basantes, M. S., y Balke, M., Underestimated diversity and range size of diving beetles in tank bromeliads—Coleoptera of ‘hygrofloric’ lifestyle (Dytiscidae). Zoological Journal of the Linnean Society, 200[3], pp. 720-735, 2023.
- [5] Hornung-Leoni, C. T., Avances sobre usos etnobotánicos de las Bromeliaceae en Latinoamérica. Boletín Latinoamericano y del Caribe de plantas Medicinales y Aromáticas, 10[4], pp. 297-314, 2011.
- [6] IUCN. 2024. The IUCN Red List of Threatened Species. Versión 2024-21. <https://www.iucnredlist.org>. Último acceso el 10/09/2024.
- [7] Li, D., Jing, M., Dai, X., Chen, Z., Ma, C., y Chen, J., Current status of pineapple breeding, industrial development, and genetics in China. Euphytica, 218[6], pp. 85, 2022.
- [8] Ruano-Fajardo, G., Rovito, S. M., y Ladle, R. J., Bromeliad selection by two salamander species in a harsh environment. PloS one, 9[6], e98474, 2014.
- [9] SIAP. 2020. Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera. Cierre de la producción agrícola por estado. SIAP-SAGARPA. <https://www.infosiap.siap.gob.mx>. Último acceso el 16/07/2024.
- [10] Zizka, A., Azevedo, J., Leme, E., Neves, B., da Costa, A. F., Caceres, D., y Zizka, G., Biogeography and conservation status of the pineapple family (Bromeliaceae). Diversity and Distributions, 26[2], pp. 183-195, 2020.



Tereftalato de polietileno de desecho (PET), su modificación mediante radiación gamma y sus diversos usos

Mtro. Joel Olaf Camacho Gutiérrez

Universidad Autónoma del Estado de México

Dr. Gonzalo Martínez Barrera

Universidad Autónoma del Estado de México

Abstract

The volume of plastic waste continues to increase each year, along with its accumulation and detrimental impact on the environment. As a result, several recycling processes have been developed to address the issue. However, the limitations of current methods highlight the urgent need to explore and adopt alternative solutions. One such promising approach is the use of gamma radiation. In recent years, gamma radiation has gained relevance due to its ability to modify and improve the physical and chemical properties of materials. For this reason, this article describes several investigations focused on the application of gamma radiation for the modification and reuse of PET waste.

Keywords: Polyethylene terephthalate waste, gamma radiation, waste management, physicochemical properties.

Resumen

La cantidad de desechos plásticos aumenta año con año y se incrementa su acumulación e impacto en el medio ambiente, razón por la cual se han ido desarrollado diversos procesos de reciclaje. No obstante, la naturaleza y las limitaciones propias de los procedimientos empleados han demostrado la urgencia de buscar y adoptar procesos alternativos. Entre los procesos novedosos, se encuentra el que involucra el uso de la radiación gamma. El cual ha adquirido relevancia en los últimos años, ya que tiene la capacidad de modificar y mejorar las propiedades físicas y químicas. Por esta razón en este artículo se describen diversas investigaciones sobre el uso de la radiación gamma en la modificación y

reaprovechamiento del PET de desecho.

Palabras clave: Tereftalato de polietileno de desecho, radiación gamma, disposición de desechos, propiedades físicas y químicas.

Introducción

Al igual que muchos otros productos elaborados con plástico, los artículos fabricados con Tereftalato de Polietileno (PET) son desechados por el consumidor una vez que se termina su vida útil. Pueden terminar depositados en los ecosistemas marinos o terrestres, perjudicando la vida de las criaturas que los habitan. El uso del PET sigue en aumento, por lo que se han buscado medidas que ayuden a reducir, disponer y reutilizar de manera eficiente su uso. Aparte del incremento en el número de rellenos sanitarios, se han desarrollado diferentes tipos de reciclamiento (primario, secundario, terciario o cuaternario), como se muestra en la figura 1 (Bhanderi, 2023).

No obstante, estos procesos cuentan con inconvenientes que limitan su uso. Por ejemplo, los rellenos sanitarios pueden afectar la calidad del aire, la tierra y las aguas subterráneas. En los procesos de reciclaje primario y secundario, puede suceder el rompimiento de cadena en las estructuras poliméricas; lo cual afecta las propiedades e imposibilitan su uso en la fabricación de nuevos productos. En los procesos de reciclaje terciario ocurren reacciones químicas que pueden emitir sustancias tóxicas. Mientras que en el reciclaje cuaternario se pueden producir emisiones gaseosas, polvo y cenizas, que impactan al medio ambiente (Alqassin, 2021; Bhanderi, 2023).

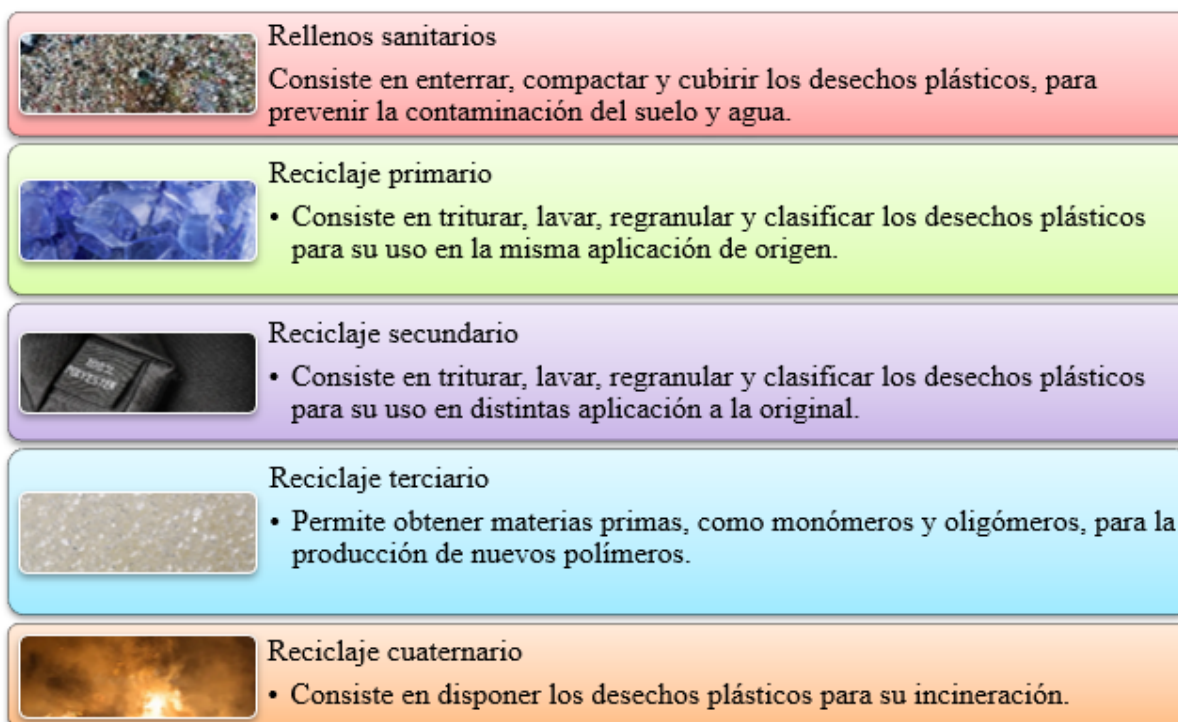


Figura 1: Procesos empleados a escala industrial para el control de desechos plásticos. Elaborado a partir de Bhanderi (2023).

Teniendo en cuenta estas desventajas, algunas investigaciones han optado por explorar técnicas o procedimientos alternativos de reciclaje, que permitan mayor aprovechamiento de los desechos plásticos.

En este sentido, en los últimos años la radiación gamma se ha vuelto

popular debido a los efectos que puede producir en los plásticos; entre los que se encuentran, la ionización de las moléculas, así como el rompimiento, entrecruzamiento o injerto de las cadenas poliméricas que conforman los plásticos (Lee, 2021; Schaefer, 2018).

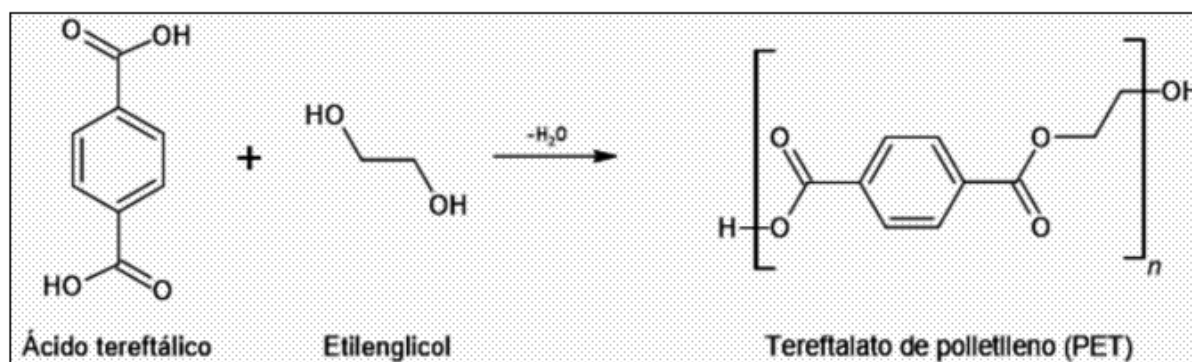


Figura 2: Estructura química y proceso de síntesis del PET. Elaboración propia.

¿Qué son los plásticos?

Los plásticos son un tipo de materiales poliméricos, que a lo largo de décadas se han utilizado en diversas aplicaciones, debido a su gran versatilidad de procesamiento y bajo costo. Debido a las propiedades con las que cuentan los plásticos, se ha logrado que numerosas industrias (la automotriz, electrónica, eléctrica, de la construcción y del empaque), produzcan un sinnúmero de productos (Bhanderi, 2023).

¿Qué es el tereftalato de Polietileno?

El Tereftalato de Polietileno (PET) es un termoplástico, que se obtiene mediante el proceso de polimerización por condensación del ácido tereftálico y el etilenglicol (ver figura 2). El PET es de los plásticos más utilizados a nivel mundial. Debido a sus características físicas y químicas, se utiliza mayormente en la elaboración de textiles y contenedores. De la producción total de PET, se estima que un 60% se destina para la manufactura de fibras sintéticas, mientras que un 30% para la elaboración de envases para bebidas (Bhanderi, 2023).

¿Qué es la radiación gamma?

La radiación gamma es un tipo de radiación electromagnética ionizante que se emite desde el núcleo atómico excitado de átomos inestables (radionúclidos) durante su desintegración radioactiva. En este proceso, el núcleo se reconfigura asimismo y libera energía para alcanzar un estado más estable (de menor energía). Los rayos gamma son paquetes de energía electromagnética (fotones), que tienen energía que oscila entre los diez mil y 10 millones de electrón-volts (eV). Además, todos los rayos gamma emitidos por un isótopo radioactivo

tienen la misma energía, no generan residuos y no inducen radiactividad en los materiales con los que entran en contacto (Drobny, 2012).

La radiación gamma tiene una mayor capacidad de penetración en la materia si se compara con la que tienen las partículas alfa y beta. La radiación ionizante genera la formación de iones y electrones, la cual se lleva a cabo a través de tres procesos principales: la dispersión de Compton, el efecto fotoeléctrico y la producción de pares (Drobny, 2012).

La dosis de radiación, que corresponde a la cantidad de energía ionizante absorbida por una unidad de masa de material, durante el proceso de irradiación, se mide en Gray (Gy). Un Gy se define como un joule por kilogramo (J/Kg). En aplicaciones prácticas, se suelen utilizar mil Grays, es decir kGy. También se suele utilizar el rad (radiation absorbed dose, por sus siglas en inglés); 100 rad equivalen a 1 Gy. Existen otras unidades de radiación: Curie (Ci), Becquerel (Bq), Roentgen (R), Coulomb/kg (C/kg), rem (rem) y Sievert (Sv), que se emplean en diversas aplicaciones. Las dosis de radiación gamma utilizadas en diversas aplicaciones varían entre menos de un 1 Gy y 30 Gy, como se muestra en la figura 3 (Drobny, 2012).

En los polímeros, la radiación gamma actúa principalmente a través de los efectos de Compton y fotoeléctrico, generando ionizaciones y electrones secundarios. Dependiendo de la tasa de dosis de radiación, así como de la presencia de oxígeno y antioxidantes, se pueden producir tres efectos primordiales: 1) El rompimiento de los enlaces covalentes en las cadenas poliméricas; 2) el entrecruzamiento de

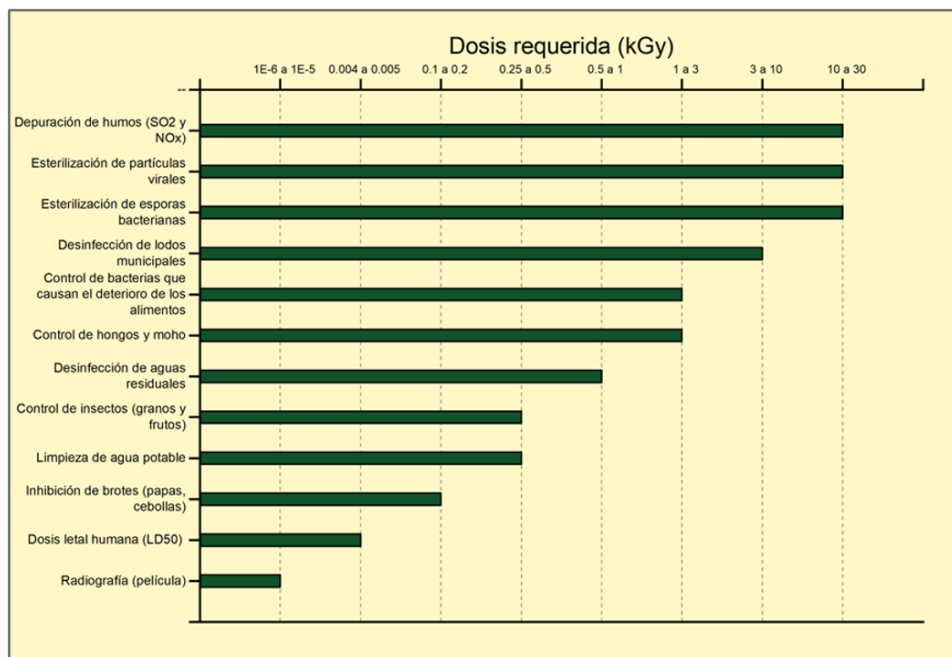


Figura 3: Dosis de radiación gamma requeridas en diversas aplicaciones. Elaboración propia a partir de Drobný (2012)

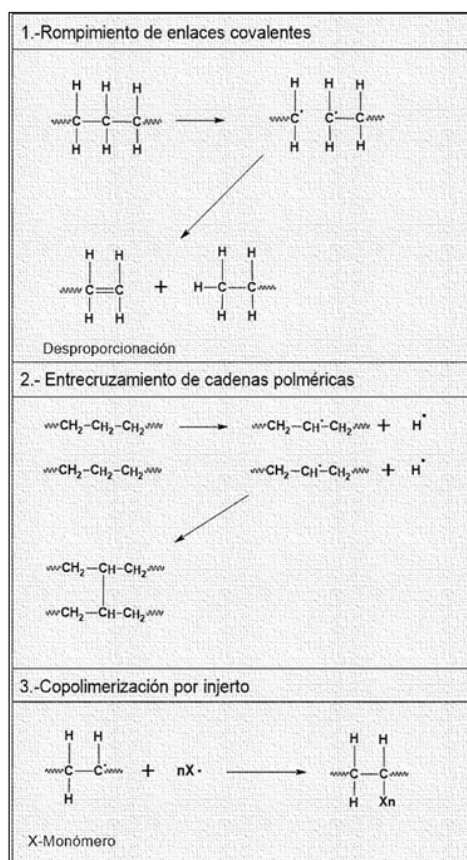


Figura 4: Cambios estructurales en los polímeros producidos por la radiación gamma. Elaboración propia a partir de Drobný (2012); Lubna (2018); Rao (2009).

cadenas poliméricas, a través de enlaces covalentes, lo que favorece la formación de redes tridimensionales; y 3) la copolimerización por injerto, en la cual los monómeros se polimerizan en la vecindad de un polímero preexistente, creando cadenas laterales a lo largo de la cadena principal del polímero. Estos efectos pueden observarse en la figura 4 (Drobny, 2012; Lubna, 2018; Rao, 2009).

Los efectos de la radiación gamma en los polímeros, que incluyen el rompimiento, el entrecruzamiento y el injerto, dependen tanto de las características estructurales del polímero como de la dosis de radiación aplicada. En este sentido, los polímeros pueden ser

clasificados en dos grupos: a) los que se presenta el entrecruzamiento de cadenas poliméricas, y b) los que presentan el rompimiento de estas (Tabla. 1). El rompimiento de las cadenas poliméricas genera la formación de gases, la aparición de fragmentos de bajo peso molecular y enlaces insaturados, además de incrementar el grado de cristalinidad. Por otro lado, el entrecruzamiento de las cadenas poliméricas puede reducir la movilidad de las estructuras poliméricas, afectando su flexibilidad y comportamiento mecánico. En contraste, la copolimerización por injerto mejora las propiedades de los polímeros sin afectar sus características intrínsecas (Drobny, 2012; Lubna, 2018; Rao, 2009).

Tabla 1: Clasificación de polímeros según su respuesta al entrecruzamiento o el rompimiento de cadenas poliméricas. Elaboración propia a partir de Drobny (2012).

Polímeros que presentan entrecruzamiento	Polímeros que presentan rompimiento
Polietileno (PE)	Politetrafluoroetileno (PTFE)
Polipropileno (PP)	Poli(alfa-metilestireno) (PAMS)
Poliestireno (PS)	Policloruro de vinilideno (PVDC)
Policloruro de vinilo (PVC)	Polifluoruro de vinilo (PVF)
Alcohol polivinílico (PVA)	Policlorotrifluoroetileno (PCTFE)
Acetato de polivinilo (PVAc)	Poliacrilonitrilo (PAN)
Poli (vinil metil éter) (PVME)	Polivinil butiral (PVB)
Polibutadieno (PB)	Polimetacrilato de metilo (PMMA)

Continúa en la siguiente página

Polímeros que presentan entrecruzamiento	Polímeros que presentan rompimiento
Hule natural (NR)	Polimetacrilonitrilo
Policloropreno (Neopreno)	Polioximetileno (POM)
Copolímero de estireno-acrilonitrilo (SAN)	Polisulfuro de polipropileno
Polietileno clorado (CPE)	Polisulfuro de etileno
Polietileno clorosulfonado (CSPE)	Celulosa
Poliámidas (PA)	Polialanina
Poliésteres	Polilisina
Poliuretanos (PU)	Polisobutileno (PIB)
Polisulfonas (PSU)	
Poliacrilatos	
Poliacrilamidas (PAMs)	
Polidimetilsiloxano (PDMS)	
Resinas fenol formaldehído (PF)	
Resinas urea formaldehído (UF)	
Resinas melamina formaldehído (MF)	

Fin de la tabla

Para cada polímero existe una dosis máxima, a partir de la cual los procesos de rompimientos o entrecruzamientos de cadena poliméricas, así como de injerto, mejoran sus propiedades. No obstante, a dosis elevadas de radiación, los polímeros experimentan degradación (Drobny, 2012; Rao, 2009).

Las dosis de radiación gamma comúnmente usadas para el tratamiento

de polímeros oscilan entre 100 Gy y 100 kGy. Dosis más altas se destinan para aplicaciones específicas. Las dosis más bajas suelen emplearse en procesos de copolimerización por injerto, polimerización de monómeros o curado de recubrimientos y adhesivos. En la figura 5 se muestran las dosis requeridas para producir diversos procesos en los polímeros.

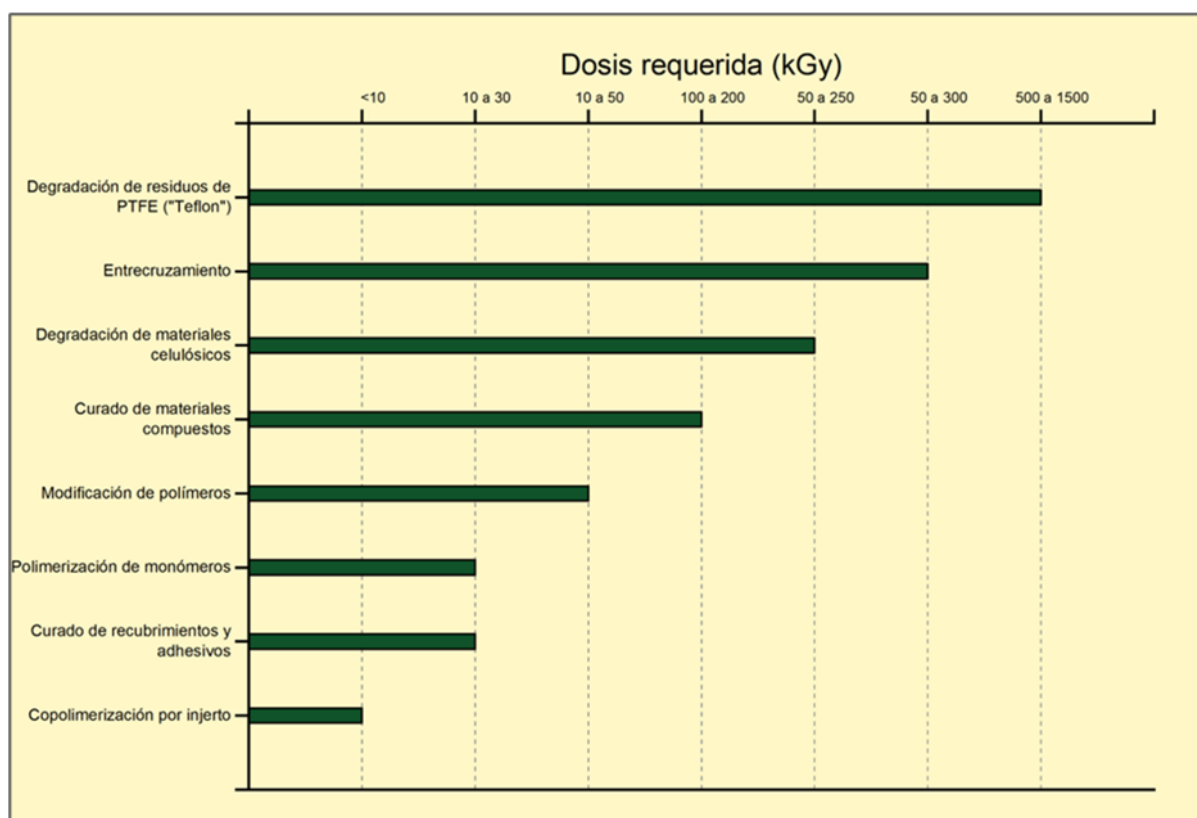


Figura 5: Dosis de radiación gamma requerida para producir diversos efectos en polímeros. Elaboración propia a partir de Drobny (2012); Rao (2009)

En algunas investigaciones sobre polímeros de desecho, se ha empleado la radiación gamma. En estas se han contemplado la optimización de propiedades, la obtención de materias primas y el desarrollo de nuevos materiales (Figura 6). Por ejemplo, mediante el entrecruzamiento de las cadenas poliméricas y la modificación superficial de los polímeros se han podido mejorar sus propiedades

mecánicas. A través del rompimiento de cadenas poliméricas, se ha logrado acelerar la desintegración de polímeros, produciendo materiales de bajo peso molecular, los cuales pueden utilizarse como aditivos o materias primas en la elaboración de nuevos productos. La radiación gamma ha contribuido al desarrollo de polímeros amigables con el medio ambiente (Jamdar, 2015; Schaefer, 2018; Usman, 2020; Zahid, 2024).

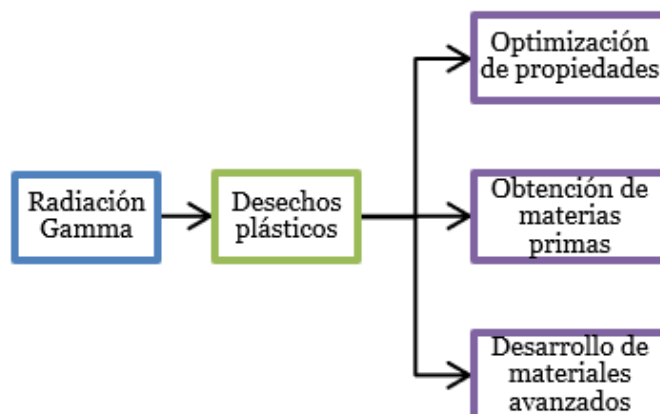


Figura 6: Aplicación de la radiación gamma en desechos plásticos. Elaboración propia a partir de Jamdar (2015); Schaefer (2018); Usman (2020); Zahid (2024).

¿Como ayuda la radiación gamma en la reutilización del PET de desecho?

Con el propósito de reincorporar el PET de desecho a la cadena productiva, en algunos estudios se ha evaluado el impacto de utilizarlo en la elaboración de materiales compuestos. Sin embargo, los productos elaborados con PET de desecho suelen presentar un rendimiento variado (Khan, 2022; Lee, 2021; Schaefer, 2018).

En vista de esto, la radiación gamma se presenta como una alternativa viable, eficiente y amigable con el medio ambiente, para mejorar el rendimiento del PET de desecho en la fabricación de nuevos compuestos. La interacción de la radiación gamma con el PET puede inducir el entrecruzamiento o el rompimiento de las cadenas que conforman su estructura polimérica. Estos efectos inciden en la movilidad molecular, la cristalinidad, el peso molecular, la resistencia química, el aislamiento térmico y eléctrico, así como en las propiedades mecánicas (resistencia mecánica, dureza, tenacidad y rigidez). El entrecruzamiento y rompimiento de las cadenas poliméricas

del PET mejorar su rendimiento. En comparación con otros polímeros, el PET es más resistente a la radiación gamma debido a la presencia de anillos aromáticos en su estructura química (Lee, 2021; Schaefer, 2018).

En las fuentes de información consultadas se encuentran diversos estudios sobre el uso de la radiación gamma en la modificación del tereftalato de polietileno de desecho (PET). Por ejemplo, en un estudio se menciona que el PET se expuso a dosis de radiación de 10, 30, 50, 70 y 100 kGy. Los efectos se manifestaron en la glicólisis del PET y en la obtención del monómero bis(2-hidroxietil) tereftalato, denominado como BHET, el cual es un compuesto orgánico, que se obtiene de la despolimerización del PET. La radiación produjo el rompimiento de las cadenas poliméricas, la formación de fragmentos más pequeños y la reducción del peso molecular. Se lograron reducir los tiempos de reacción de acuerdo la dosis de radiación aplicada. Por ejemplo, en PET sin irradiar se obtuvo cierta cantidad de BHET en cuatro horas de reacción, sin embargo, la misma cantidad de BHET se obtuvo en dos horas, pero irradiando el PET a una

dosis de 50 kGy (Jamdar *et al.*, 2015). El PET de desecho se ha reutilizado en diversas aplicaciones, como las que se

muestran en la Figura 7. Las cuales se describen a continuación.



Figura 7: Aplicaciones del PET de desecho sometido a la radiación gamma. Elaboración propia

Mediante el uso de la radiación gamma se han podido injertar polímeros en matrices de tereftalato de polietileno (PET), por ejemplo, Lubna *et al.*, 2018, injertaron monómero de vinil acetato (VAc) en películas de PET reciclado con el propósito de incrementar las propiedades mecánicas y térmicas. Los resultados muestran un aumento en la rigidez del PET cuando se agrega vinil acetato y se irradiada. Se obtuvo un 132.25 % de incremento en la resistencia a la flexión en películas con 15 % de vinil acetato e irradiadas a una dosis de 3 kGy. Sin embargo, la deformación a la ruptura disminuyó en 31.83 %. En el caso de las propiedades térmicas, los injertos presentan mayor estabilidad térmica, debido a que movilidad de moléculas disminuye a causa de la introducción de unidades monoméricas de vinil acetato en el PET. La descomposición del injerto acontece a los 95°C, mayor a la temperatura a la cual se descompone el PET.

En el caso del uso de PET de desecho como dosímetros, se produjeron películas con PET, las cuales fueron irradiadas a dosis de 150, 300, 400

y 670 kGy. La radiación generó entrecruzamiento de las cadenas poliméricas y empaquetamiento de estas en ciertas regiones, esto aumento la cristalinidad de las películas. Las propiedades de los dosímetros se relacionan tanto con la longitud de onda como con la energía detectadas. En las películas irradiadas a una dosis de 670 kGy, los picos en el espectro UV-vis se observaron a grandes longitudes de onda, mientras que el gap óptico se detectó a energías menores (Kumar, 2012).

En el caso de los pavimentos asfálticos, en un estudio se prepararon mezclas con 5, 10, 15 y 20 % de hojuelas de tereftalato de polietileno de desecho al asfalto. Las mezclas asfálticas se calentaron hasta los 155°C, con la finalidad de que el PET se reblandeciera y tuviera mayor interacción con el aglomerante. Como se sabe, el PET se funde a temperaturas entre 240 y 260°C. Los resultados muestran que mezclas asfálticas con 10 % de hojuelas tuvieron mayor rigidez y resistencia al ahuellamiento, es decir mayor ondulación en la superficie. Mas aún, los asfaltos expuestos a una dosis de 100 kGy presentaron

mayores rendimientos mecánicos, esto fue debido a las modificaciones del PET (rompimiento de cadenas poliméricas e incremento de la rugosidad superficial) y a una mayor interacción con el aglomerante (Usman *et al.*, 2020).

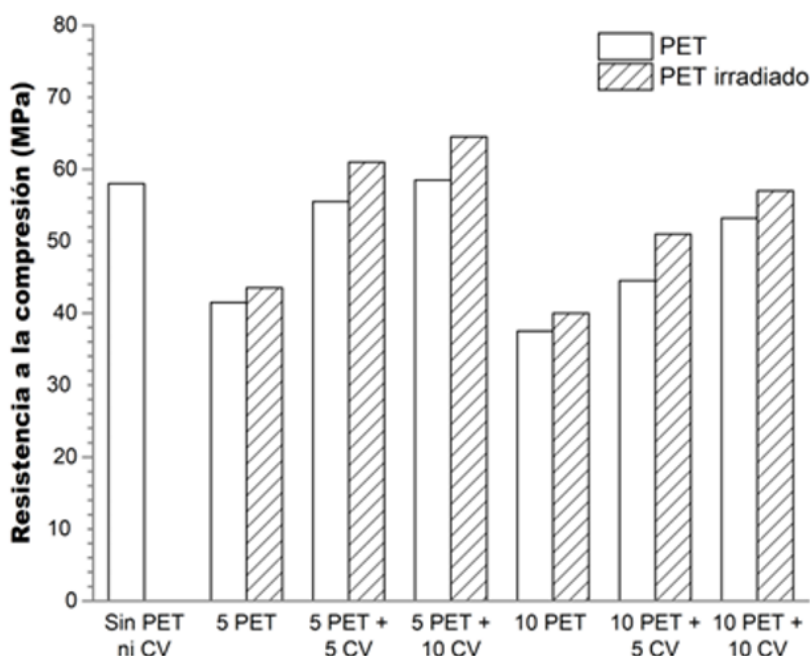


Figura 8: Resistencia a la compresión de pavimentos modificados con PET de desecho y ceniza volante, después de 28 días de curado. Elaborado a partir de Khan (2022)

El PET de desecho se ha utilizado en la elaboración de pavimentos semiflexibles. En un estudio, se elaboraron tres tipos de pavimentos modificados con diferentes materiales, los cuales se dejaron curar durante 28 días para alcanzar la dureza requerida. El primer tipo de pavimento fue modificado con cemento Portland; el segundo tipo fue modificado con la mezcla de 5 y 10 % de PET de desecho, ceniza volante (CV) y cemento Portland, mientras que el tercer tipo con ceniza volante, cemento Portland y PET irradiado a una dosis de 100 kGy. Los resultados se muestran en la Figura 8. Se observa que el pavimento modificado solo con cemento presenta una resistencia a compresión de 58 MPa. Mientras que los pavimentos modificados con la mezcla de cemento, PET de desecho y ceniza volante, disminuyeron sus resistencias

hasta en un 46%. Sin embargo, los pavimentos modificados con la mezcla de PET de desecho irradiado, ceniza volante y cemento tuvieron mayor resistencia, 65 MPa, lo que significó un incremento del 12%. La radiación gamma modifica el área superficial e incrementa la cristalinidad del PET, lo cual mejora la interacción con los aglomerantes y hace del PET, un material de refuerzo efectivo. En el caso de la resistencia a la flexión, se obtuvieron mejores resultados, ya que las resistencias de pavimentos modificados con PET y ceniza volante disminuyeron hasta en un 13%, mientras que los pavimentos con PET irradiado y ceniza volante, la disminución fue solo del 5% (Khan, 2022).

En la preparación del concreto, el PET irradiado se ha utilizado para

mejorar las propiedades mecánicas. La adición del PET produce disminución del peso y de las propiedades mecánicas del concreto, específicamente en las resistencias a la tensión, flexión y compresión. Sin embargo, el uso de la radiación gamma ha permitido minimizar estas pérdidas (Lee, 2021). Por ejemplo, Schaefer *et al.*, 2018, añadieron 1.25% de PET irradiado a dosis de 10 y 100 kGy al concreto elaborado con cemento Portland. Los resultados mostraron 20% de aumento en la resistencia a la compresión de concreto con PET irradiado a 100 kGy, esto se debió a las modificaciones del PET producidas por la radiación gamma, que consistieron en el aumento de la cristalinidad y la disminución de la porosidad.

También se ha utilizado el PET de desecho en la elaboración de geopolímeros, es decir materiales inorgánicos que se obtienen a partir de la activación de minerales naturales, desechos o subproductos industriales. Zahid *et al.*, (2024) elaboraron geopolímeros utilizando ceniza volante (CV), micro-sílice, nano-plaquetas de grafeno, fibras de alcohol polivinilo y 25% de PET de desecho. Este último se irradió a 100 kGy. En geopolímeros con PET, la resistencia a la compresión disminuyó 7.3%, mientras que en geopolímeros con PET irradiado se incrementó 13%. En el caso de la resistencia a la flexión, se incrementó 9.3% en geopolímeros con PET irradiado. Estos aumentos se debieron a una mayor interacción del PET los materiales del geopolímero, generada por el aumento de la cristalinidad y rugosidad de las partículas de PET producida por la radiación gamma.

Conclusiones

Cada año se genera una gran cantidad

de desechos de PET, y las limitaciones de los procesos actuales para su control y reutilización, hacen evidente la necesidad de adoptar estrategias alternativas. Dentro de las opciones que han sido poco estudiadas, se encuentra la radiación gamma, una técnica con la habilidad de modificar y optimizar las propiedades del PET. Lo cual podría permitir su uso en la fabricación materias primas y materiales avanzados en diferentes sectores de la industria. El tratamiento de los desechos plásticos con radiación gamma no solo ha contribuido al cuidado del medio ambiente, sino que ha permitido la creación de materiales con valor añadido. Se sugiere en futuros estudios, investigaciones sobre el uso del PET irradiado en la fabricación de novedosos materiales, especialmente aquellos que incorporen residuos de distinta naturaleza.

Referencias

- [1] Alqassim, A.Y. (2021). Environmental health impacts of municipal solid waste landfilling and incineration in different health systems: A review. *Hail Journal of Health Sciences*, 3 (1), 13-24. <https://doi.org/10.4103/1658-8312.347572>
- [2] Bhandari, K.K., Joshi, J.R., & Patel, J.V. (2023). Recycling of polyethylene terephthalate (PET or PETE) plastics—An alternative to obtain value added products: A review. *Journal of the Indian Chemical Society*, 100 (1), 100843. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100843>
- [3] Drobny, J. G. (2012). *Fundamentals of Radiation Chemistry and Physics* (Ed.: J.G. Drobny), William Andrew Publishing, 11-26. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-7881-2.00002-X>

- [4] Jamdar, V., Kathalewar, M., Jagtap, R.N., Dubey, K.A., & Sabnis, A. (2015). Effect of Y-irradiation on glycolysis of PET waste and preparation of ecofriendly coatings using bio-based and recycled materials. *Polymer Engineering & Science*, 55(11), 2653-2660. <https://doi.org/10.1002/pen.24158>
- [5] Khan, M.I., Sutanto, M.H., Napiah, M.B., Zoorob, S.E., Yusoff, N.I.M., Usman, A., & Memon, A.M. (2022). Irradiated polyethylene terephthalate and fly ash based grouts for semi-flexible pavement: Design and optimisation using response surface methodology. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(8), 2515-2530. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1861446>
- [6] Kumar, V., Ali, Y., Sonkawade, R.G., & Dhaliwal, A.S. (2012). Effect of gamma irradiation on the properties of plastic bottle sheet. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 287, 10-14. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2012.07.007>
- [7] Lubna, M.M., Salem, K.S., Sarker, M., & Khan, M.A. (2018). Modification of thermo-mechanical properties of recycled PET by vinyl acetate (VAc) monomer grafting using gamma irradiation. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 83-90. <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0922-0>
- [8] Lee, H., Cheon, H., Kang, Y., Roh, S., & Kim, W. (2021). State-of-the-art modification of plastic aggregates using gamma irradiation and its optimization for application to cementitious composites. *Applied Sciences*, 11(21), 10340. <https://doi.org/10.3390/app112110340>
- [9] Rao, V. (2009). Radiation processing of polymers. *Advances in polymer processing*, 402-437. <https://doi.org/10.1533/9781845696429.3.402>
- [10] Schaefer, C.E., Kupwade-Patil, K., Ortega, M., Soriano, C., Büyüköztürk, O., White, A.E., & Short, M.P. (2018). Irradiated recycled plastic as a concrete additive for improved chemo-mechanical properties and lower carbon footprint. *Waste management*, 71, 426-439. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.033>
- [11] Usman, A., Sutanto, M. H., Napiah, M., Zoorob, S.E., Khan, M.I., & Ibrahim, M.B. (2020). Application of gamma irradiation on Polyethylene Terephthalate (PET) for use in asphaltic concrete mixtures as aggregates replacement. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 498 (1) 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/498/1/012008>
- [12] Zahid, M., Abbas, Y.M., Shafiq, N., Khan, M.I., & Ismail, F.I. (2024). Sustainable engineered geopolymer composites utilizing gamma-irradiated PET and graphene nanoplatelets: Optimization and performance enhancement. *Sustainability*, 16 (17) 7455. <https://doi.org/10.3390/su16177455>



