Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

Julio - Septiembre 2026 ISSN:2683-2607

No. 147

ANÁLISIS DE GESTIÓN DE RIESGO CLIMÁTICO, METEOROLÓGICO Y GEODINÁMICO EN EL ESTADO DE PUEBLA, MÉXICO.

CUANDO LA FÍSICA Y LA MEDICINA LATEN AL MISMO RITMO

HONGOS Y BACTERIAS PARA LA RESTAURACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS CON PETRÓLEO

Imagen creada con IA generativa — OpenAI / ChatGPT

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Casa abierta al tiempo

Revista de las divisiones de CBI y CBS



Imagen creada con IA generativa — OpenAI / ChatGPT

Contenido

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

No. 147 Julio - Septiembre 2026

Editorial 3

Análisis de gestión de riesgo climático, meteorológico y geodinámico en el estado de Puebla, México 5
Dr. Rogelio Ramos Aguilar
Mtra. Patricia Máximo Romero
Mtro. Máximo Ávila Cruz
Mtro. Víctor Galindo López
Pasante Perla Cano Maceda
Pasante Perla Yoselyne Valencia Fuentes
Pasante Jessica Azucena Mejía Hernández
Estudiante Mayumi López López
Estudiante Juan Pablo Velazquez Aparicio

Cuando la física y la medicina laten al mismo ritmo 31
Dr. Jesús Enrique Escalante Martínez
Estudiante María José Mora Montoya

Hongos y bacterias para la restauración de sitios contaminados con petróleo 40
M. C. Ana Cecilia Alcala Hernandez
Dr. Benjamín Abraham Ayíl Gutiérrez
Dr. José Alberto López Santillán
Dr. Benigno Estrada Drouaillet
Dra. Diana Laura Peraza Liñan
Dr. Wilberth Alfredo Poot Poot

Aplicación y evolución de las terapias térmicas contra el cáncer alrededor del mundo 49
Dra. Citlalli Jessica Trujillo Romero
Dra. Raquel Martínez Valdez
Dr. Texar Javier Ramírez Guzmán
Médico Residente José Raziel Sánchez Sánchez
Dr. José de Jesús Agustín Flores Cuautle

Análisis de valores máximos de altura de precipitación pluvial de las estaciones climatológicas del servicio meteorológico nacional 60
Dr. Jair Del Valle Morales
M- C. Erika Hernández Vivar
Dra. Claudia Rojas Serna

Información y tecnologías cuánticas: programa emergente del posgrado divisional de ciencias básicas e ingeniería 69
Dr. Gilberto Espinosa Paredes
Dr. Miguel A. Bastarrachea Magnani
Dr. Rodolfo O. Esquivel Olea
Dr. José L. Hernández Pozos
Dra. Norma P. Castellanos Abrego
Dr. Humberto Laguna Galindo
Dr. Isaac Pérez Castillo
Dr. Robin Preenja Sagar
Dr. Alejandro Kunold
Dr. Norberto Aquino Aquino
Dr. Jorge R. Bolaños Servín
Dr. Adrián M. Escobar Ruiz
Dr. Ángel A. García Chung
Dr. Roberto Quezada Batalla
Dr. Josué I. Ríos Cangas
Dr. Enrique Rodríguez de la Colina
Dr. Leonardo Palacios Luengas

La ciencia detrás del secado solar 82
Mtr. Carlos Castañeda Zuluaga
Dra. Yuridiana Rocío Galindo Luna
Dr. Fernando Gabriel Arroyo Cabañas

Las células cancerosas descubren otros mundos al hacer metástasis 90
Dr. Juan Carlos Gallardo Pérez
Dr. Álvaro Marín-Hernández
Dra. Diana Xochiquetzal Robledo Cadena
M en C. Cristina Trejo Solís

Lactancia materna: ¿Podría ser un escudo protector contra la esclerosis múltiple? 97
M.D. Alejandro Hernandez Zarate
Dra. Graciela Ordoñez
M.D. Julio Sotelo
Dra. Roxana Magaña Maldonado

Del descubrimiento de la morfina a la síntesis del fentanilo 104
D. en C. María Elena Sánchez Mendoza
D. en C. Yaraset López Lorenzo
D. en C. Jesús Arrieta

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

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

Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

CONACYT
ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Rector General
Dr. Gustavo Pacheco López
Secretaria General
Dra. Esthela Irene Sotelo Núñez

UNIDAD IZTAPALAPA
Rectora
Dra. Edith Ponce Alquicira
Secretario
Dr. Javier Rodríguez Lagunas
Director de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Dr. Juan Morales Corona
Directora de la División de Ciencias Biológicas y de la Salud
Dra. Edith Arenas Ríos

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería:
Consejo Editorial:
Dra. Edith Ponce Alquicira
Dr. Javier Rodríguez Lagunas
Dr. Juan Morales Corona
Dra. Edith Arenas Ríos
UAM- Iztapalapa
Editora en Jefe:
M. C. Alma Edith Martínez Licona
Asistente Editorial:
Ing. Gabriela López Rodríguez
Comité Editorial por CBS:
Dra. Laura Josefina Pérez Flores, Dr. Pedro Luis Valverde Padilla, Dra. Herlinda Bonilla Jaime
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. 147, Julio - Septiembre 2026, es una publicación trimestral de la Universidad Autónoma Metropolitana a través de la Unidad Iztapalapa, División de Ciencias Básicas e Ingeniería y División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Av. Prolongación Canal de Miramontes 3855, Col. Rancho los Colorines, Alcaldía Tlalpan, C.P. 14386, México, Ciudad de México y Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1a Sección, Iztapalapa, Cd. de México. C.P. 09310, Edificio T144, Tel. 5804 – 4600. Ext. 1144. Página electrónica de la revista: https://contactos.izt.uam.mx/ y dirección electrónica: cts@xanum.uam.mx 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 30 de Septiembre de 2026. Tamaño del archivo 63.8 MB.

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

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

Fecha de Publicación:
Julio - Septiembre 2026.

Los artículos publicados en **Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería** son sometidos a arbitraje; para ello se requiere enviar el trabajo en Word a https://contactos.izt.uam.mx/
Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería,
UAM – Iztapalapa, T144, Tel. 5804-4600. Ext. 1144
Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186. C.P. 09310
e-mail cts@xanum.uam.mx

Editorial

Antes que nada, queremos ofrecer una sincera disculpa a nuestros lectores y colaboradores por el error de edición presentado en el Número 146 de la revista, correspondiente a junio de 2026. Reconocemos la importancia de brindar información científica precisa y cuidadosamente revisada, por lo que se presenta la fe de erratas ubicada en la pág. 113 del presente número.

Agradecemos la comprensión de nuestros lectores y reiteramos nuestro compromiso con la calidad, precisión y responsabilidad en la difusión del conocimiento científico.

En este número presentamos una selección de trabajos que reflejan la diversidad de la ciencia y su importancia para comprender y atender algunos de los desafíos que enfrenta nuestra sociedad. A través de distintas disciplinas, nuestros autores abordan temas relacionados con el medio ambiente, la salud, la tecnología y el estudio de los fenómenos naturales.

Entre los contenidos destacan los análisis sobre los riesgos climáticos, meteorológicos y geodinámicos en Puebla. También se exploran alternativas para la restauración de sitios contaminados con petróleo mediante hongos y bacterias, mostrando el potencial de la ciencia para contribuir al cuidado del medio ambiente.

En el ámbito de la salud, este número reúne investigaciones sobre la relación entre la física y la medicina, el desarrollo de terapias térmicas contra el cáncer, el proceso de metástasis y la posible relación entre la lactancia materna y la esclerosis múltiple.

A ello se suma una mirada hacia el desarrollo de la información y las tecnologías cuánticas, un campo que representa nuevos retos y oportunidades para la investigación y la formación académica.

Con esta variedad de perspectivas, buscamos acercar a nuestros lectores al conocimiento científico y mostrar cómo la investigación continúa generando preguntas, alternativas y nuevas formas de comprender nuestro entorno. Esperamos que los contenidos de este número despierten su interés y motiven la reflexión y la curiosidad por seguir explorando el mundo de la ciencia.

Gracias por acompañarnos en un número más.

Atentamente
MC Alma E. Martínez Licona
Editora en Jefe, Revista Contactos

Información para autores

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

Las secciones que la constituyen son:

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

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

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

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

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

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

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

7. Los laureles de olivo. Los absurdos de la vida cotidiana y académica (4 cuartillas).

En todos los casos se debe incluir los nombres completos de los autores con su adscripción, dirección, teléfono y dirección de correo electrónico.

Normas

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

1. Resumen escrito en español e inglés.
2. 4 palabras clave en español e inglés.
3. Cuando se incluya una abreviatura debe explicarse por una sola vez en la forma siguiente: Organización de los Estados Americanos (OEA). . .
4. Cuando se utilice un nombre técnico o una palabra característica de una disciplina científica deberá aclararse su significado de la manera más sencilla posible.
5. Las citas textuales deberán ir de acuerdo al siguiente ejemplo: En cuanto a la publicación del placebo se asevera que "el efecto placebo desapareció cuando los comportamientos se estudiaron en esta forma" (Núñez, 1982, p.126).
6. Las referencias (no más de 10) se marcarán de acuerdo al siguiente ejemplo: Sin embargo, ese no es el punto de vista de la Escuela de Copenhague (Heisenberg, 1958), que insiste en...
7. Al final del artículo se citarán las referencias por orden alfabético de autores. Pueden añadirse lecturas recomendadas (no más de 5).
8. Cada referencia a un artículo debe ajustarse al siguiente formato: Szabadváry, F. y Oesper, E., Development of the pH concept, J. Chem. Educ, 41 [2], pp.105 -107, 1964.
9. Cada referencia a un libro se ajustará al siguiente formato: Heisenberg, W., Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science, Harper Torchbook, Nueva York, pp.44-58, 1958.
10. Para páginas electrónicas: dirección (fecha de acceso).
11. Los títulos de reportes, memorias, etcétera, deben ir subrayados o en itálicas.

Envío y características del artículo

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

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

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería.
UAM – Iztapalapa, T144,
Información: cts@xanum.uam.mx,
Tel. 5804-4600. Ext. 1144.
Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186.
C.P. 09310

Arbitraje

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

Análisis de gestión de riesgo climático, meteorológico y geodinámico en el estado de Puebla, México.

Dr. Rogelio Ramos Aguilar
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria S/N, Colonia San Manuel., Puebla, México.

Mtra. Patricia Máximo Romero
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria S/N, Colonia San Manuel., Puebla, México.

Mtro. Máximo Ávila Cruz
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria S/N, Colonia San Manuel., Puebla, México.

Mtro. Víctor Galindo López
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria S/N, Colonia San Manuel., Puebla, México.

Pasante Perla Cano Maceda
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria S/N, Colonia San Manuel., Puebla, México.

Pasante Perla Yoselyne Valencia Fuentes
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria S/N, Colonia San Manuel., Puebla, México.

Pasante Jessica Azucena Mejía Hernández
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria S/N, Colonia San Manuel., Puebla, México.

Estudiante Mayumi López López
Universidad Autónoma de Guerrero, Centro Regional de Educación Superior Zona Centro Campus Zumpango México

Estudiante Juan Pablo Velazquez Aparicio
Universidad Autónoma de Guerrero, Centro Regional de Educación Superior Zona Centro Campus Zumpango México

Foto Rogelio Ramos Aguilar, archivo personal,2026.

Summary
This study analyzes natural hazards in two key areas of the state of Puebla: the Puebla metropolitan area and the Popocatepetl volcano. in the first, the arrival time of a primary and secondary seismic wave from the states of Chiapas, Guerrero, Michoacan, Jalisco, Oaxaca, and Colima is analyzed, in addition to analyzing the velocity isolines (isokinetic), taking as a reference earthquakes of magnitude greater than or equal to 7 degrees according to the National Seismological Service, those that occurred west of Acatlan de Osorio with a magnitude of 7.1 on October 24, 1980, southeast of San Gabriel Chilac with a magnitude of 7.0 on June 15, 1999, and northwest of Chiautla de Tapia with a magnitude of 7.1 on September 19, 2017. For the Popocatépetl volcano area, atmospheric dynamics (wind direction) and types of eruptions that could indicate possible risks to the population are examined.

For both areas, freely available meteorological data was collected and processed using modeling and interpolation software, generating climate maps for different periods of years with Surfer software. The analysis is supported by tools such as Google Earth Pro, GPS Visualizer, and Erupt, to understand its evolution and mitigate risks in the event of a possible eruption. The results are intended to be integrated into risk maps that support disaster planning and prevention in the state of Puebla.

Index words: cartography, model, study, geostatistics, prevention, vulnerability.

Resumen
Este estudio analiza los riesgos naturales en dos zonas claves de estado de Puebla: la zona metropolitana de Puebla y el volcán Popocatépetl; en la primera se analiza el tiempo de arribo de una onda sísmica primaria y secundaria desde los estados de Chiapas, Guerrero, Michoacán, Jalisco, Oaxaca y Colima, además de analizar las isolíneas de velocidades (isocinéticas), tomando como referencia los sismos de magnitud mayor o igual a 7 grados de acuerdo al Servicio Sismológico Nacional, los ocurridos al Oeste de Acatlán de Osorio con magnitud 7.1 el 24 de Octubre de 1980, al Sureste de San Gabriel Chilac con magnitud 7.0 el 15 de Junio de 1999 y al Noroeste de Chiautla de Tapia de magnitud 7.1 el 19 de Septiembre del año 2017. Para la zona del volcán Popocatépetl, se examina su dinámica atmosférica (dirección del viento) y tipos de erupciones que pudieran indicar posibles riesgos a la población.

Para ambas zonas se recopilaron datos meteorológicos de libre acceso que se procesaron mediante software de modelado e interpolación, generando mapas climáticos en distintos periodos de años con el software Surfer, El análisis se apoya en herramientas como Google Earth Pro, GPS Visualizer y Erupt, a fin de comprender su evolución y mitigar riesgos ante una posible erupción.

Los resultados pretenden integrarse a mapas de riesgo que apoyan la planificación y la prevención de desastres en el estado de Puebla.

Palabras clave: cartografía, modelo, estudio, geoestadística, prevención, vulnerabilidad.

Introducción

El estado de Puebla, identificado como la entidad número 021 por el INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática),

es una región de México, que a pesar de no experimentar desastres naturales con la misma frecuencia o gravedad que las zonas costeras, muestra una notable variabilidad en sus patrones meteorológicos y climáticos. Con una temperatura media anual de 17.5 °C y una temperatura máxima promedio de 28.5 °C durante los meses de abril y mayo, el monitoreo de las condiciones atmosféricas y del cambio climático reciente en Puebla resulta fundamental debido a la importancia social, económica y ambiental de sus diversas zonas. Este monitoreo es respaldado por estaciones meteorológicas del SMN (Servicio Meteorológico Nacional, no. 21.249 Africam Safari, no. 21.242 Capulac y no. 21.136 Acajete,) y de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, lo que permite un análisis constante y detallado del clima, especialmente para comprender las alteraciones recientes en el periodo 2000-2024 y proyectar su comportamiento futuro.

Las estaciones utilizadas son las más representativas de la zona de estudio y son la base de datos para el análisis, utilizando las variables de precipitación y temperatura para este caso.

Este trabajo representa un desarrollo novedoso, ya que la poca información existente ha sido generada por los estudios y análisis del Cuerpo Académico de Investigación: Ciencias de la Tierra Aplicada a la Gestión de Desastres Naturales, es casi nula la existencia de información o trabajos académicos y de investigación en estas áreas y zonas de estudio. (Ramos *et al,* 2024).

Por otro lado, el volcán Popocatépetl es uno de los volcanes más activos de México, representa un riesgo significativo en el estado. La clasificación y el análisis estadístico de sus sismos volcánicos son esenciales para entender su dinámica y predecir posibles erupciones. Así mismo los modelos eruptivos resultantes nos permiten tomar medidas preventivas, protegiendo así a la población y sus alrededores.

La zona metropolitana y el volcán Popocatépetl de Puebla son regiones cuyas características geomorfológicas describen valles y montañas que se caracterizan por ser escarpadas y contar con valles profundos que la vuelven propensa a deslizamientos y colapsos de sus laderas. Esta inestabilidad se intensifica tanto por factores naturales como por actividades humanas, elevando el riesgo de desastres naturales. Para abordar este riesgo, se realizó un análisis que incluye variables como las distancias y pendientes. Los modelos matemáticos y las herramientas de representación del terreno nos permiten identificar zonas de alto riesgo y generar cartografía de riesgo.

Este trabajo busca proporcionar un análisis de los riesgos climáticos, meteorológicos y geodinámicas en áreas estratégicas del estado de Puebla, ofreciendo una base para la toma de decisiones informadas en la gestión de riesgos y la protección de comunidades vulnerables frente a diversos fenómenos naturales, no solo para la comunidad científica sino principalmente para el Gobierno en las áreas de Protección Civil y Gestión de Riesgo.

Materiales y métodos

Caso zona metropolitana de Puebla-Tlaxcala

La zona metropolitana de Puebla-Tlaxcala está conformada por un total de 38 municipios, siendo Puebla el

núcleo principal y en torno al cual las demás ciudades funcionan, además de que alberga aproximadamente el 50% de la población del estado de Puebla. Sin embargo, también existen otras localidades de la metrópoli con gran acumulación de población. Gracias a esto, la zona antes mencionada es donde el presente estudio se centra para conocer a profundidad el cambio que se ha tenido a lo largo de los años.

A partir de los datos obtenidos y procesados, se procura ver si existe una frecuencia de fenómenos extremos, como las “islas de calor”, el “gradiente adiabático seco” y los eventos de “El Niño” y “La Niña”, que hayan influido en las temperaturas y patrones de precipitación; además de una deforestación en áreas circundantes relacionadas.

Análisis de datos

Las variables con que se realizó el estudio propuesto se obtuvieron de un total de 12 estaciones para la zona de Puebla, información que fue obtenida de los datos de uso libre a los que da acceso el Servicio Meteorológico Nacional. Las principales variables rescatadas de dichas estaciones fueron de temperatura y precipitación para los años 2000 al 2024. Posteriormente se clasificaron los datos por decadas, siendo los 3 periodos 2000-2010, 2010-2020 y 2020-2024, respectivamente.

Los datos promediados extraídos del sistema meteorológico nacional y reflejados en las siguientes figuras corresponden a los meses representativos por cada estación del año, procesados en una hoja de cálculo, para la elaboración de tablas y promedios. A partir de la base de datos creada, se introdujeron las variables de las estaciones meteorológicas, en conjunto con sus coordenadas para crear la cartografía correspondiente a primavera, verano, otoño e invierno de los periodos elegidos con anterioridad. La figura 1, realizada con el software especializado en Ciencias de la Tierra Golden Surfer (versión 22.0), muestra la comparativa para las variables de temperatura y de precipitación.

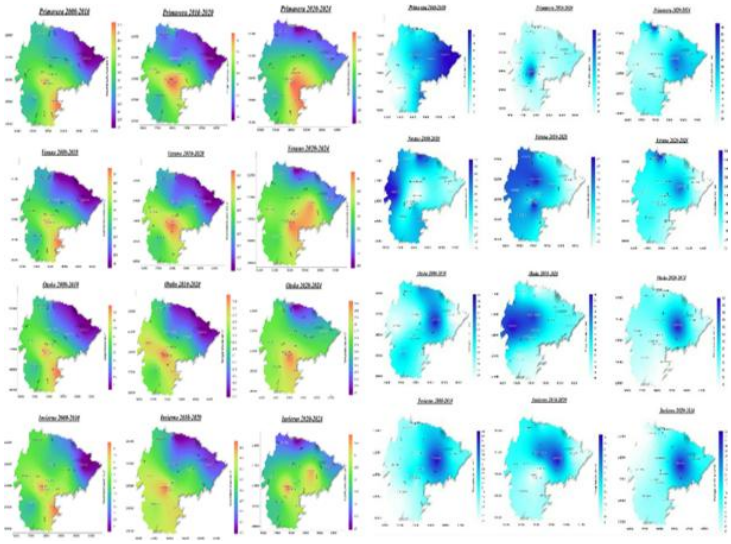


Figura 1: Modelos de temperaturas y precipitación promedio. 2000-2024. Zona metropolitana de Puebla. (a)Temperatura promedio; (b)Precipitación promedio.

En los modelos, las temperaturas más altas durante los periodos elegidos se dieron en la zona centro, con dirección a la ciudad de Puebla y a la zona en que se encuentra la estación no. 21.249 Africam Safari mientras que las más bajas se dan en dirección a las localidades cercanas a la Malinche, como lo es la zona de estación no. 21.136 Acajete. Esto puede deberse a que aquellas áreas cercanas a las cumbres de zonas montañosas, debido a la altura sobre el nivel del mar, sufren de un fenómeno denominado "gradiente adiabático seco", que es descrito como el cambio de temperatura de una masa de aire mientras es elevado en la atmosfera. Por otra parte, las altas temperaturas en las zonas centrales de Puebla pueden ser ocasionadas por el fenómeno de "islas de calor", donde las estructuras de zonas urbanizadas como es el caso ocasionan la absorción del calor y su lenta liberación posterior.

Otra observación obtenida de los modelos es que existe un aumento de aproximadamente el 1% en la temperatura promedio de la mayoría de las estaciones, siendo el caso de otoño el que más llama la atención por obtener un cambio de casi el 3% para el periodo de 2020-2024 respecto a 2000-2010. Por otro lado, los datos más altos obtenidos para otoño fueron de 18.91 °C en el sector centro, mientras que el más bajo fue de 15.01 °C, en la localidad de Acajete, respectivamente.

En los mapas de precipitación, el cambio es mucho más drástico respecto a cada estación, especialmente en la temporada de verano en la que la precipitación aumenta, pues se presentaron lluvias en promedio menores para verano del 2020-2024 con respecto al periodo de 2000-2010, siendo el caso contrario el de la temporada de invierno, donde no es común la presencia de lluvias mayores a 20 mm, caso que sí se dio en el tercer periodo analizado. Esto puede ser a causa de los constantes cambios climáticos que han ocasionado la formación de ciclones y huracanes cuyas consecuencias, si bien se han dirigido a zonas costeras, han repercutido en los estados de la zona centro de México como lo es Puebla.

Se puede apreciar también que, en el caso de la variable de temperatura, un factor común es que la estación no. 21.249 Africam Safari es la que tiene los registros más altos y que como se mencionó brevemente antes, las estaciones centrales registraron siempre mayor actividad. Para el tercer periodo de estudio, un comportamiento anormal fue el registrado en la estación no. 21.242 Capulac y no. 21.136 Acajete, donde existió un aumento de más del 13% con temperaturas de hasta 2 °C mayores, lo que podría significar que además del aumento por el cambio climático, otro factor de variación se ha dado gracias a la deforestación masiva de árboles en consecuencia de la expansión poblacional poco regulada, dejando al suelo en esta zona desnudo y causando que no haya presencia adecuada de evapotranspiración. Cabe destacar que no fue la única época del año en que estas estaciones tuvieron registros más altos de lo normal, pues en verano del 2020-2024 también se presentó esta irregularidad. En general, para el periodo 2020-2024, sí existe un aumento en las temperaturas promedios para todas las estaciones del año respecto al primer y segundo periodo de estudio.

En el cuanto a la precipitación, vemos que en general, los periodos 2000-2010 y 2010-2020 se comportan de forma muy similar, dando concordancia en las lluvias que se presentaron en los meses del estudio. Sin embargo,

para el tercer periodo de estudio, los registros son más variables y existieron valores atípicos en todas las temporadas, especialmente para las estaciones de Capulac y Teolocholco donde la actividad fue mucho mayor de la regular en todas las temporadas, presentando valores de hasta más de 150 mm de lluvia en otoño y más de 20 mm en invierno, lo que significa presencia común de lluvias atípicas en temporadas ajenas a las esperadas. Otoño (noviembre) y verano (junio) fueron los periodos de mayor actividad, registrando valores que van de entre 150 mm a 315 mm en la época de 2020 a 2024.

Una vez obtenidos estos datos, también se realizó el análisis de los registros históricos de las temperaturas y precipitaciones tanto máximas como mínimas extremas, donde se obtuvieron los datos de temperaturas y de precipitación máximas y mínimas extremas de los cuatro meses de estudio por estación del año, anotando en que meses ocurrieron estos eventos y los años de estos. Posteriormente fueron procesados con el software especializado en modelos ambientales GEOEAS (versión 3.0) para la obtención de sus gráficos de dispersión, analizando su comportamiento. El procedimiento en las figuras 2, 3 y 4, se realizó en primera instancia con los datos de temperaturas

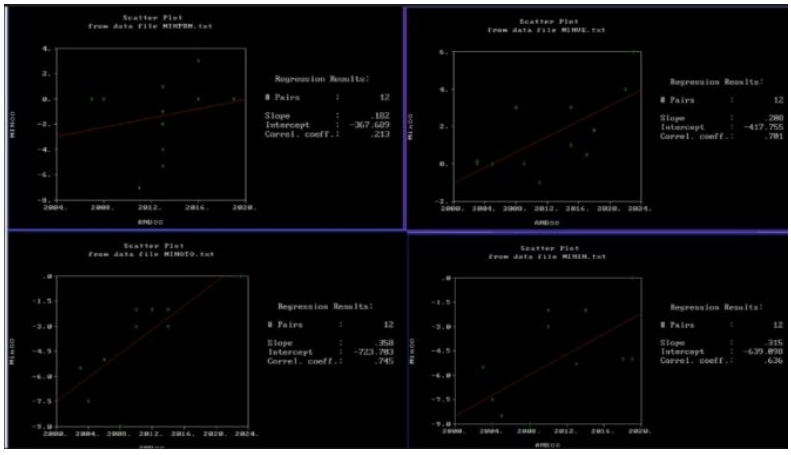


Figura 2: Gráfico de dispersión para temperaturas mínimas 2000-2024. (a) Primavera; (b)Verano; (c)Otoño; (d)Invierno.

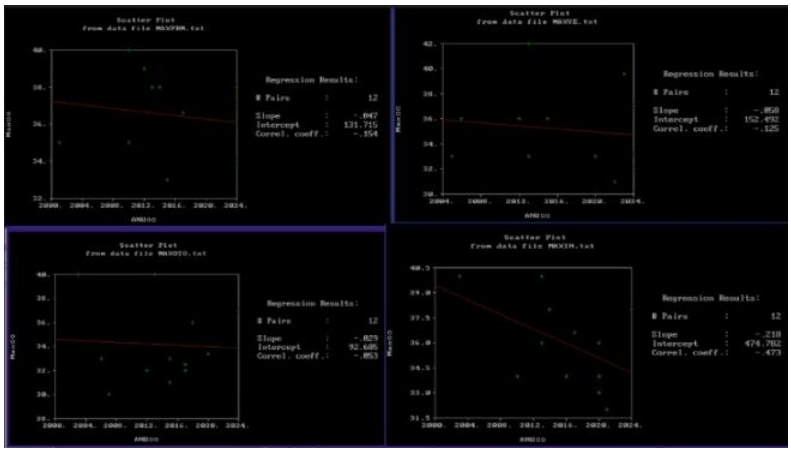


Figura 3: Gráfico de dispersión para temperaturas máximas 2000-2024 (a) Primavera; (b)Verano; (c)Otoño; (d)Invierno.

Para la variable independiente, se colocaron los años más recientes en que las máximas y mínimas extremas ocurrieron, mientras que la variable dependiente fueron las temperaturas registradas en el tiempo especificado.

En los gráficos de dispersión para la temperatura, en los valores mínimos extremos se puede ver que la mayor proximidad a la tendencia de nuestra línea se da en aquellos valores cercanos a 0 °C, para primavera y verano, mostrando valores atípicos en los años 2011, siendo más bajo de lo normal, mientras que, en otoño e invierno, la tendencia se acerca a valores entre 5 °C y 7 °C, mostrando valores atípicos para los años 2016 al 2024 en que la temperatura fue mucho mayor a la normal registrada.

En el caso de la temperatura máxima extrema hay mayor variación con respecto a cada año, para primavera y verano la tendencia se da a valores de entre 30 °C y 36 °C, pero hay valores atípicos para los años que abarcan los periodos de 2020 a 2024, ya que el valor se dispara a más de 37 °C, llegando incluso a los 40 °C. En el caso de otoño e invierno, el valor regular se registra en tendencia de entre 32 °C a 36 °C, pero hay variaciones para el periodo que cubre los años 2018-2024, registrando temperaturas de hasta 37 °C y 40 °C.

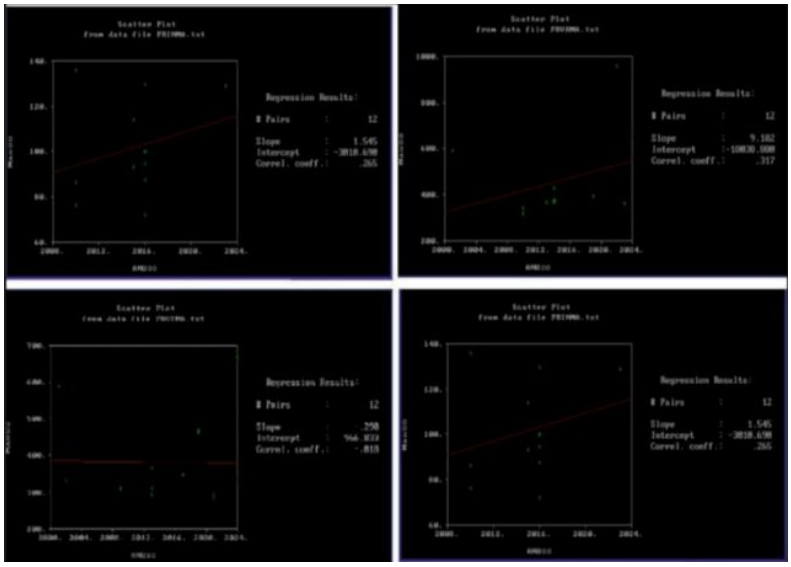


Figura 4: Gráfico de dispersión para precipitación máxima 2000-2024 (a) Primavera; (b)Verano; (c)Otoño; (d)Invierno

Para el caso de precipitación únicamente se generó el grafico de dispersión para los registros máximos extremos. (Figura 4.)

En los cuatro periodos registrados, existe una tendencia común, siendo verano la temporada con mayor lluvia e invierno con menor. Sin embargo, algo a destacar es que en todas las temporadas existen valores atípicos de precipitación para los años 2022 y 2024, en los que hubo más lluvia de la comúnmente registrada fuera de los periodos generales, especialmente para la temporada de primavera en la que no se suelen presentar este fenómeno en valores mayores a 300 mm.

Análisis general del comportamiento de ondas sísmicas en la dinámica estructural del Estado de Puebla.

El desarrolló se realizó mediante un enfoque cuantitativo-geoespacial que integró el procesamiento de datos sísmicos con su modelización a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG). La metodología implementada permitió analizar los efectos potenciales de la actividad sísmica registrada en los Estados de Chiapas, Guerrero, Michoacán, Jalisco, Oaxaca y Colima sobre el territorio de Puebla, con especial énfasis en la región de la Ciudad de Puebla y la Mixteca.

Para el desarrollo de la investigación, se procesaron datos sísmicos mediante herramientas especializadas como Google Earth Pro y Surfer, complementadas con una base de datos estructurada en hojas de cálculo. El análisis incluyó el estudio de las características de propagación de las ondas primarias (P) y secundarias (S) en diferentes medios geológicos (basalto, granito, areniscas y calizas), considerando parámetros fundamentales como el tiempo de arribo y la distancia epicentral.

La generación de mapas de isolíneas se realizó aplicando el algoritmo de interpolación espacial (Kriging), que permitió estimar valores en zonas no muestreadas a partir de los datos disponibles. Este proceso dio lugar a dos tipos de representaciones cartográficas: mapas isocinéticos (que muestran la velocidad de propagación sísmica) y mapas isócronos (que representan los tiempos de arribo de las ondas).

Los resultados obtenidos se integraron en plataformas SIG para producir material cartográfico detallado, cuyo objetivo principal fue identificar franjas de ruptura sísmica y evaluar su posible influencia en el territorio poblano. La metodología empleada combinó de manera efectiva técnicas geoespaciales avanzadas con modelos físicos de propagación de ondas, proporcionando así herramientas valiosas para la gestión y prevención de riesgos sísmicos en la región.

Para el desarrollo de esta investigación se emplearon diversos equipos tecnológicos y herramientas digitales que permitieron el procesamiento, análisis y visualización de los datos geoespaciales y sísmicos

Para determinar vibraciones sísmicas en el volcán Popocatépetl, comprender y entender mejor la dinámica terrestre, se utilizó un Dron (Figura 5) y sensores de prueba climáticas y detector de movimientos (Figura 6).



Figura 5: Dron DJI Phantom 3 utilizado durante las visitas a campo.



Figura 6: Uso de sensores ambientales y de movimiento en la visita a campo.

Geográficamente el Estado de Puebla colinda con los Estados de Veracruz, Hidalgo, Tlaxcala, Morelos, Guerrero, México y Oaxaca. Dentro de este contexto estatal, se realizó un enfoque técnico que prioriza a la Capital de Puebla y la Mixteca como área de estudio para determinar la distancia y tiempo de arribo de las ondas sísmicas primarias y secundarias. Caracterizado por su geomorfología de riesgo y los procesos sísmicos y tectónicos que presenta.

Identificación de los Estados con mayor actividad sísmica y su importancia para el Estado de Puebla

Se identificó los puntos de rompimiento sísmico que se dan con mayor actividad sísmica y que pudieran afectar a Puebla, principalmente a la Capital Mixteca. Esta selección se fundamentó en los catálogos del Servicio Sismológico Nacional (SSN), con registros históricos de sismos de magnitud mayor a 7 grados, del periodo de 1900 a la fecha (2025), debido a su alta vulnerabilidad ante eventos sísmicos generados en estas regiones, lo que se traduce en riesgos potenciales para su población, infraestructura y desarrollo económico.

Cálculo de distancias de los principales puntos de rompimiento (Ciudad de Puebla y Mixteca)

El cálculo se implementó con la herramienta Google Earth Pro, para determinar las distancias de puntos de rompimiento sísmico que pudieran afectar a la zona de estudio, de los Estados con mayor actividad sísmica, Chiapas, Guerrero, Michoacán, Jalisco, Oaxaca y Colima, como se observa en la figura 7.

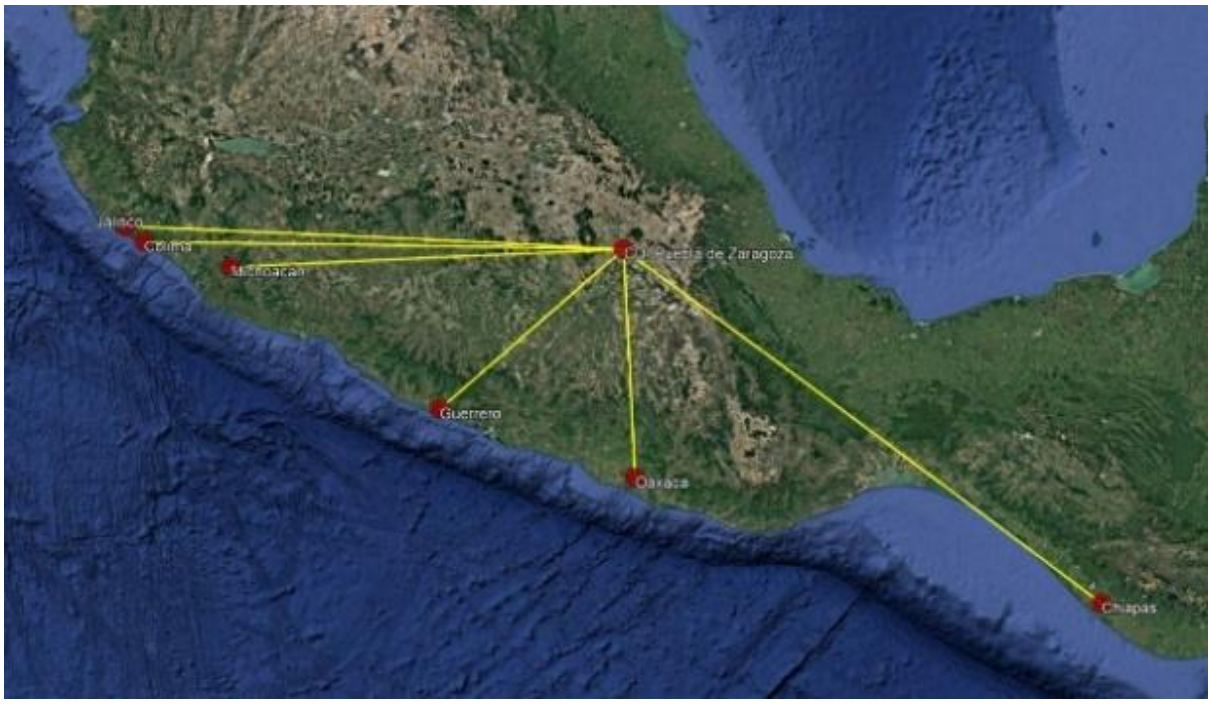


Figura 7: Se realizó el procedimiento para determinar las distancias de los diferentes estados seleccionados, a Puebla (Capital y Mixteca).

Una vez se obtuvieron las distancias lineales (en metros) desde los principales puntos de rompimiento sísmico hacia las áreas de estudio, Puebla y la Mixteca, se hizo una hoja de cálculo, para procesar la información obtenida aplicando modelos matemáticos.

Tabla 1: Distancias de rompimiento a la zona de estudio.

Lugar de rompimiento	**Zona de afectación**	**Distancia**
Chiapas, Cd. Hidalgo	Puebla-Mixteca	740,406 metros
Guerrero, Benito Juárez	Puebla-Mixteca	208,006 metros
Oaxaca, Pinotepa Nacional	Puebla-Mixteca	206,089 metros
Michoacán, Coalcomán	Puebla-Mixteca	543,721 metros
Jalisco, Cihuatlán	Puebla-Mixteca	697,095 metros
Colima, Tecomán	Puebla-Mixteca	628,699 metros

Para el análisis y comprensión del comportamiento de las ondas sísmicas en relación con el riesgo geomorfológico, resulto esencial estimar el tiempo de llegada de las ondas sísmicas desde el punto de origen (rompimiento) hasta las zonas de estudio. En particular, se consideraron tanto las ondas primarias (P) como las ondas secundarias (S). Dado que dicha información no se encontraba disponible en bases de datos consultadas, se procedió a su cálculo mediante la fórmula de la cinemática: $t = \frac{d}{v}$ (1) donde:

- t = tiempo de arribo (segundos),
- d = distancia entre el epicentro y el punto de estudio (metros),
- v = velocidad promedio de propagación de la onda (m/s).

Las velocidades asignadas a los cálculos matemáticos se obtuvieron de datos existentes, estas velocidades están determinadas a los distintos tipos de materiales de propagación sísmica (Basalto, Granito, Areniscas y Calizas), separadas por ondas primarias (P) y secundarias (S), como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2: Se muestran las velocidades de las ondas sísmicas primarias (P) y secundarias (S) y sus distintas disposiciones según el medio en el que se mueve.

Medio	**Velocidad de la onda primaria en m/s**	**Velocidad de la onda secundaria en m/s**
Basalto	6400	2150
Granito	5200	3000
Arenisca	3500	2150
Calizas	2400	1350

Una vez se dispusieron los datos para el cálculo matemático, se inició con la obtención del tiempo de arribo de las ondas sísmicas desde el punto de origen (rompimiento) hasta las zonas de estudio.

Se inicio con el cálculo de los tiempos de arribo del Estado de Guerrero, en el cual se tomó como punto de mayor actividad sísmica el municipio de Benito Juárez, localizado en la región Costa Grande. Tomando en cuenta que la distancia del punto de mayor actividad sísmica a la primera área de estudio (Ciudad de Puebla) específicamente la Catedral es de 319,702 metros, el modelo para calcular el tiempo en segundos de arribo se desarrolló con todas las velocidades de la onda primaria de los distintos medios geológicos.

Para el medio de Basalto:

$$t = \frac{319{,}702}{6400} = 49{,}953$$

Para el medio de Granito:

$$t = \frac{319{,}702}{5200} = 61{,}481$$

Para el medio de Arenisca:

$$t = \frac{319{,}702}{3500} = 91{,}343$$

Para el medio de Calizas:

$$t = \frac{319{,}702}{2400} = 133{,}209$$

Obtenidos los tiempos de llegada para las ondas sísmicas primarias (P), se calcularon los tiempos de arribo de las secundarias (S) usando el mismo procedimiento, sustituyendo las velocidades correspondientes de la tabla 2.

Para el medio de Basalto:

$$t = \frac{319{,}702}{2150} = 148{,}698$$

Para el medio de Granito:

$$t = \frac{319{,}702}{3000} = 106{,}657$$

Para el medio de Arenisca:

$$t = \frac{319{,}702}{2150} = 148{,}698$$

Para el medio de Calizas:

$$t = \frac{319{,}702}{1350} = 236{,}816$$

Obtenidos los tiempos de arribo para las ondas sísmicas primarias (P) y secundarias (S), se organizaron los resultados en dos tablas independientes. Cada tabla representa los valores

calculados de tiempo de llegada, asociados a los distintos medios geológicos de propagación considerados. Estas tablas permitieron visualizar de manera clara las variaciones en los tiempos de arribo según el tipo de material, lo que constituye un insumo clave para el modelado cartográfico posterior. Además, esta representación tabular facilitó la comparación directa entre ambos tipos de ondas y su comportamiento en distintos escenarios geológicos, fortaleciendo el análisis geomorfológico del riesgo sísmico en las zonas de estudio. Esto se muestra en la tabla 3 y 4.

Tabla 3: Tiempos de arribo de ondas sísmicas primarias (P) según medio geológico.

Distancia	Medio	Velocidad (m/s)	Tiempo de llegada (s)
319,702	Basalto	6400	49.953
319,702	Granito	5200	61.481
319,702	Arenisca	3500	91.343
319,702	Calizas	2400	133.209

Tabla 4: Tiempos de arribo de ondas sísmicas secundarias (S) según medio geológico.

Distancia	Medio	Velocidad (m/s)	Tiempo de llegada (s)
319,702	Basalto	2150	148.699
319,702	Granito	3000	106.567
319,702	Arenisca	2150	148.699
319,702	Calizas	1350	236.816

El mismo procedimiento de cálculo fue aplicado para los demás puntos seleccionados tales como Oaxaca, Michoacán, Chiapas, Colima y Jalisco. En cada caso, se identificó un punto de rompimiento sísmico característico dentro del Estado correspondiente, y se determinó la distancia hasta las áreas de estudio de la ciudad de Puebla y la Mixteca, utilizando Google Earth Pro. Posteriormente, se calcularon los tiempos de arribo de las ondas sísmicas primarias (P) y secundarias (S) mediante el modelo matemático, considerando las velocidades de propagación asociadas a los diferentes tipos de medio geológico. Los resultados fueron sistematizados en tablas comparativas para su análisis y uso en los procesos de modelado cartográfico.

Modelación cartográfica

La cartografía obtenida de ondas Primarias referente al Estado de Guerrero, arribando al área de estudio en los diferentes medios geológicos en escala de grises; del análisis de comportamiento de ondas sísmicas primarias de velocidades (isocinéticas) y arribo (isócronas), en escala de grises que afectarán la zona de referencia de estudio (Puebla, Capital y Mixteca). Imagen procesada de la herramienta (Surfer) (Figura 8).

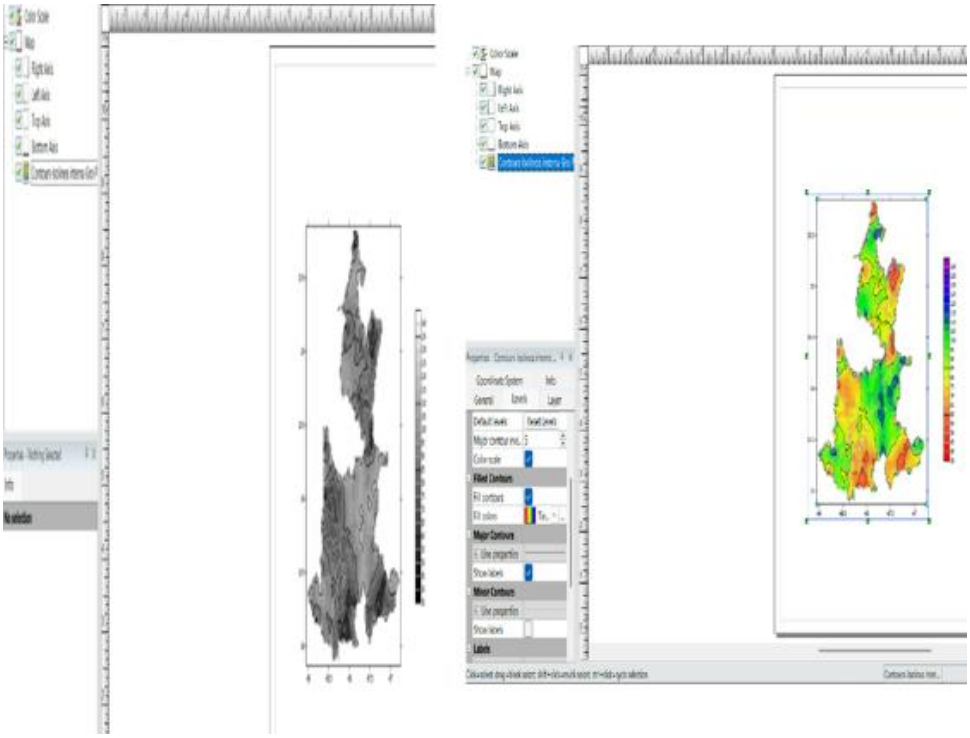


Figura 8: Ejemplo de mapa cartográfico de isolíneas del análisis de comportamiento de ondas sísmicas primarias de velocidades.

Modelación en 2D y 3D de la zona de estudio para representación del terreno (Figura 9).

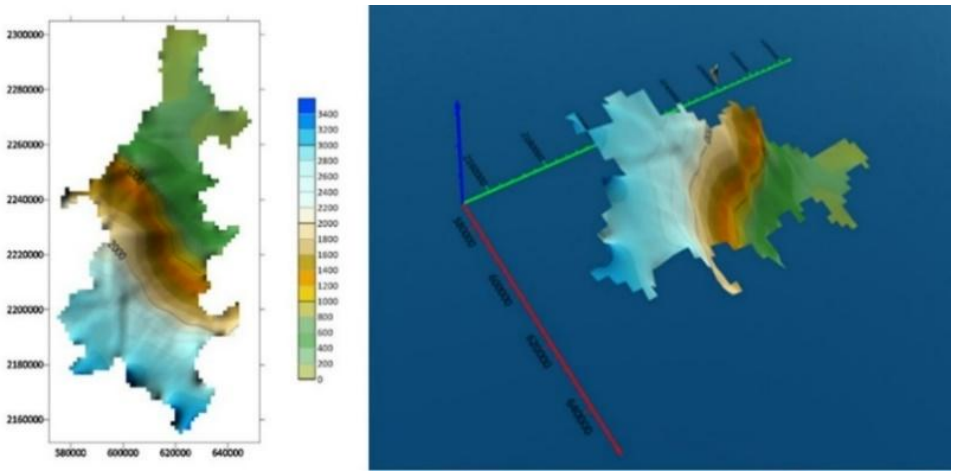


Figura 9: Modelo de la zona metropolitana del estado de Puebla en 2D y 3D.

En los modelos de cálculo de distancias punto a punto, se observa que las zonas con distancias más cortas corresponden a puntos más próximos entre sí. En el modelo de pendiente, la mayoría de los valores se encuentran entre -5 y 5; una pendiente positiva indica una elevación que sube de izquierda a derecha, mientras que una pendiente negativa refleja un descenso de izquierda

a derecha.

Al analizar todos los modelos, se interpreta que la mayoría del área presenta pendientes entre -5% y 5%. Esto indica que las zonas de mayor elevación, especialmente en el sur de la zona metropolitana, correspondientes a los puntos del 320 a 500 en la base de datos, presentan un mayor riesgo de colapso estructural. Esta vulnerabilidad se debe a que, en dichas áreas, la gravedad es más intensa, lo que incrementa la probabilidad de deslizamientos y colapsos en terrenos inclinados.

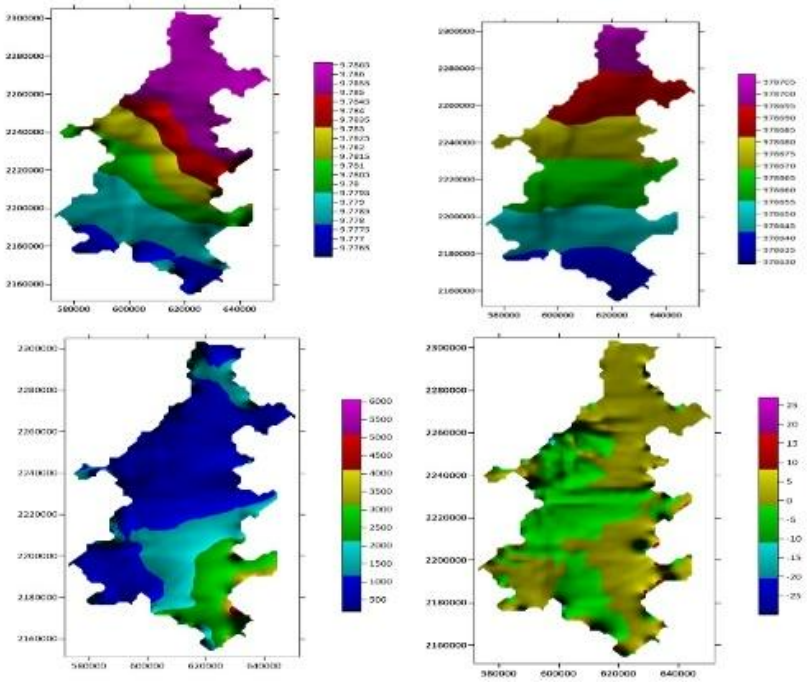


Figura 10: Modelo de la gravedad local, teórica y modelos de distancias y pendientes.

Caso Volcán Popocatépetl

El volcán Popocatépetl está ubicado en el estado de Puebla (19.02° N, 98.62° W) a una distancia de 44,67 km. Para determinar la distancia que existe entre nuestro volcán, específicamente hablando del cráter y Ciudad Universitaria ubicada en Puebla, Puebla. Se utilizó el software de acceso libre Google Earth, que nos ayudara a determinar la distancia de manera más específica con imágenes satelitales.

Aplicando el modelo matemático ideal siguiente:

$$t = \frac{d}{v} = 44\,667{,}35\,\text{m}$$

Con ayuda de este mismo software se realizó el cálculo del diámetro del cráter, como apoyo para corroborar si existe una modificación se contó con información de CENAPRED y su Antena de monitoreo sísmico. La observación y análisis del movimiento constante del volcán Popocatépetl proporciona una oportunidad única para mejorar la comprensión dinámica interna.

Se realizaron polígonos en el software de acceso libre Google Earth Pro, con la finalidad de obtener cuatro tipos de polígonos de diferentes zonas del volcán para obtener un estudio e información más específica (Figuras 11, 12 y 13).



Figura 11: Área total de la base del volcán.

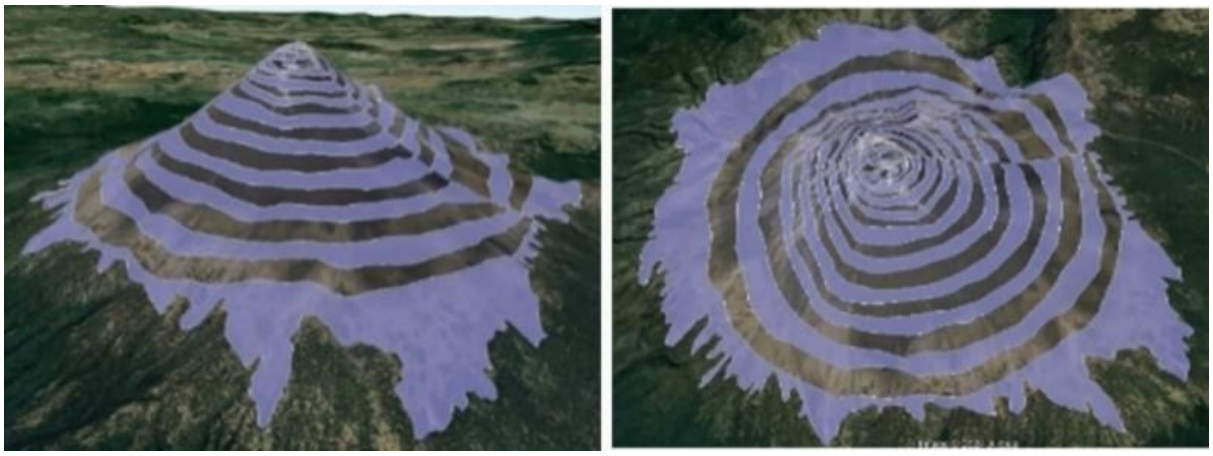


Figura 12: Área total de la base del volcán

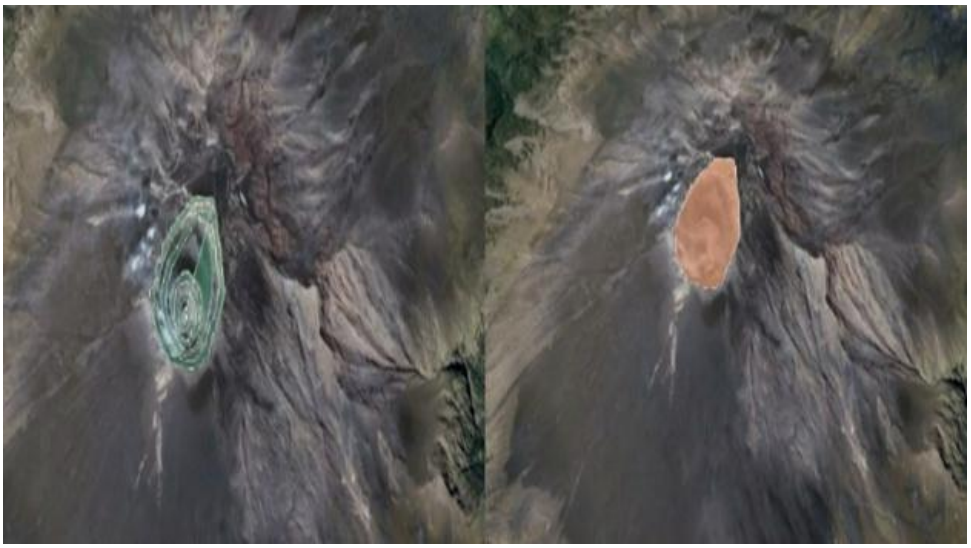


Figura 13: Estructura total del cráter y profundidad.

De la misma manera se realizó en este software el cálculo del área, perímetro y longitud del contorno del cráter. Al realizar los polígonos se hizo la conversión de datos obtenidos de cada uno en una plataforma digital de uso libre llamada GPS VISUALIZER, en donde al descargar e ingresar los archivos los transforma en formato KML, estos archivos aportan la información precisa y necesaria para proceder a crear archivos en el software SURFER, en donde se realizará la modelación y el análisis de las superficies 3D.

Modelados 3D de la estructura del Volcán.

Representación tridimensional detallada de la forma y estructura del volcán, incluyendo su relieve, pendientes, curvas de nivel, cráteres y otras características geológicas (Figura 14).

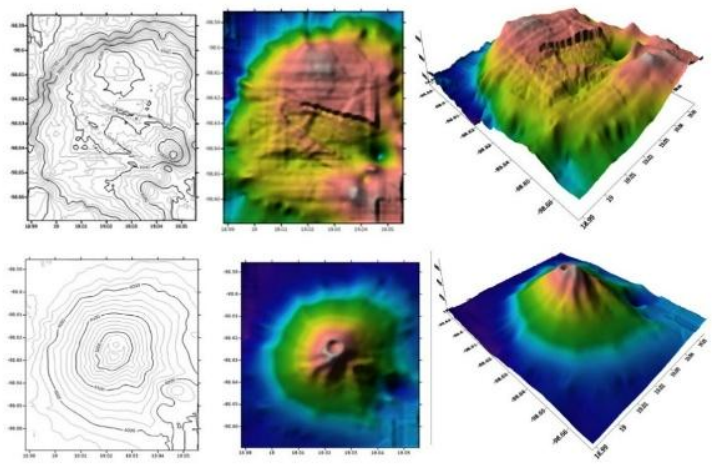


Figura 14: Representación tridimensional de la estructura del volcán.

Modelados 3D de la estructura del cráter

Es una representación tridimensional detallada de la forma y estructura del cráter, incluyendo características geométricas, como lo es su profundidad, diámetro, forma y las pendientes (Figura 15).

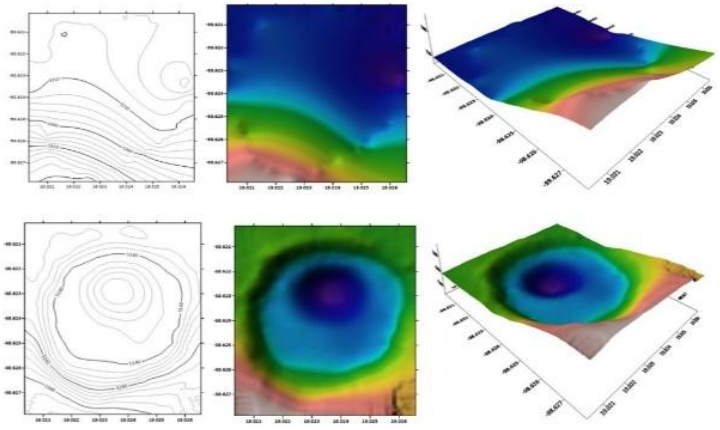


Figura 15: Representación tridimensional detallada de estructura del cráter.

Perfiles de la estructura del volcán.

Se realizó la obtención de perfiles en 2 distintos softwares (Figura 16 y 17), con la finalidad de hacer su análisis comparativo, poder identificar diferencias en su representación topográfica y evaluar la influencia de la resolución y el método de obtención de datos, así mismo la mejora de la precisión combinando datos de diferentes fuentes para obtener un modelo más preciso e identificar patrones y tendencias en diferentes escalas.

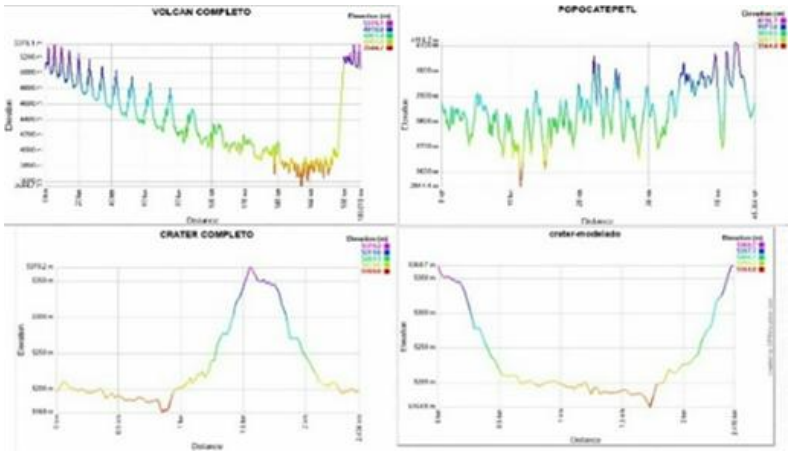


Figura 16: Análisis comparativo de perfiles con GPS Visualizer.

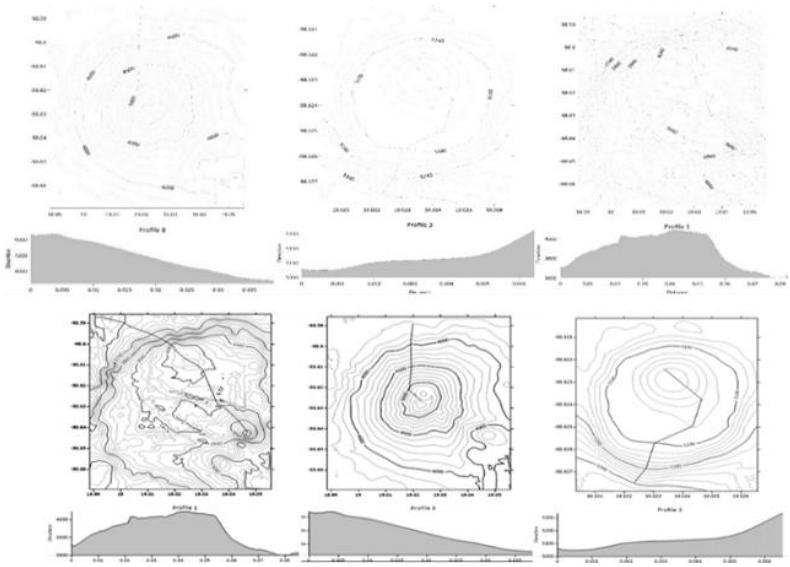


Figura 17: Análisis comparativo de perfiles con Surfer.

Modelos eruptivos en el software Erupt.

El volcán inició un episodio de actividad con nuevas emisiones de ceniza, un tremor indicó el inicio de la erupción del Popocatépetl el 11 de diciembre de 1994, una primera parte duro 135 minutos, pocas horas después, sería de 90 minutos (Figura 18).

La erupción generó una columna de humo de 8 km por encima del volcán, se registró caída de ceniza volcánica que incluso llegó hasta la Ciudad de México. (CENAPRED, 2024).

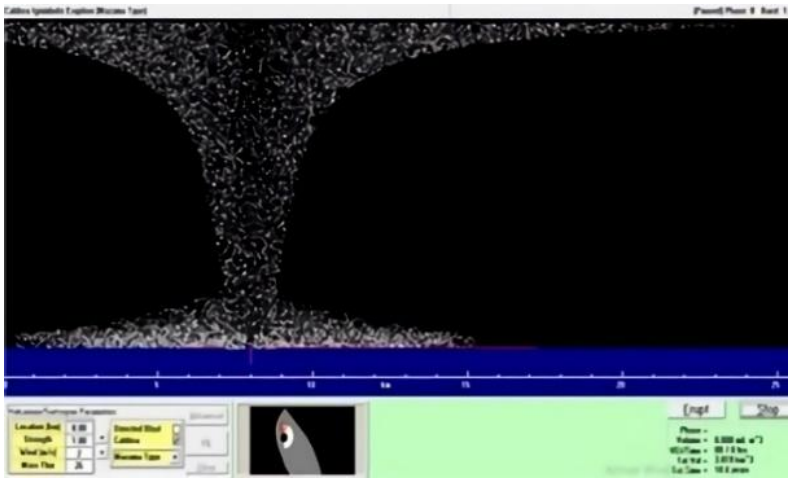


Figura 18: 11 de diciembre del 1994, El despertar del volcán Popocatépetl.

El día 19 de marzo del 2019 el volcán Popocatépetl hizo una erupción violenta y arrojó material incandescente como expulsión de cenizas, la caída de proyectiles balísticos que alcanzaron un metro de diámetro. La fuerza del gas rompió el domo de lava del cráter, que había alcanzado los 16 millones de metros cúbicos en sólo 19 horas (Figura 19).

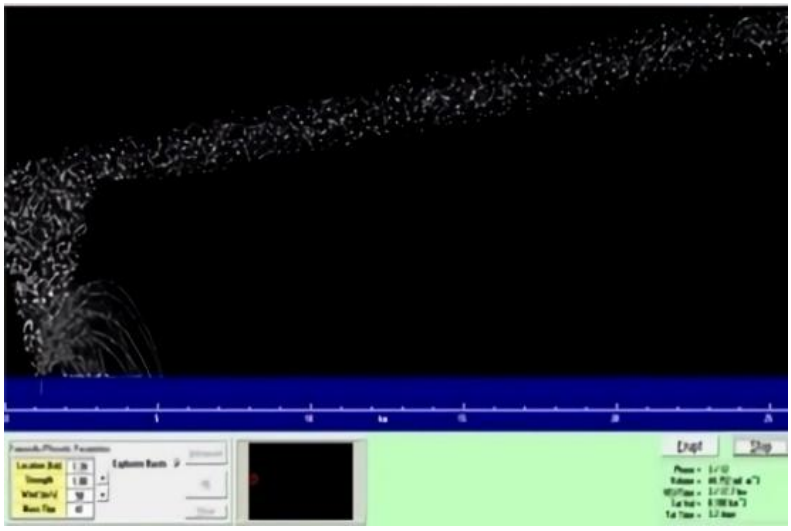


Figura 19: 19 de marzo de 2019, la erupción más violenta.

Una de las últimas actividades registradas fue el día 7 de noviembre del año 2024, en que los escenarios previstos para esta fase y como se muestra en la figura 20 fueron:

- Lluvias de ceniza leves a moderadas en poblaciones circundantes y en algunas ciudades más lejanas.
- Expulsión de fragmentos incandescentes dentro del radio de exclusión de 12 km.

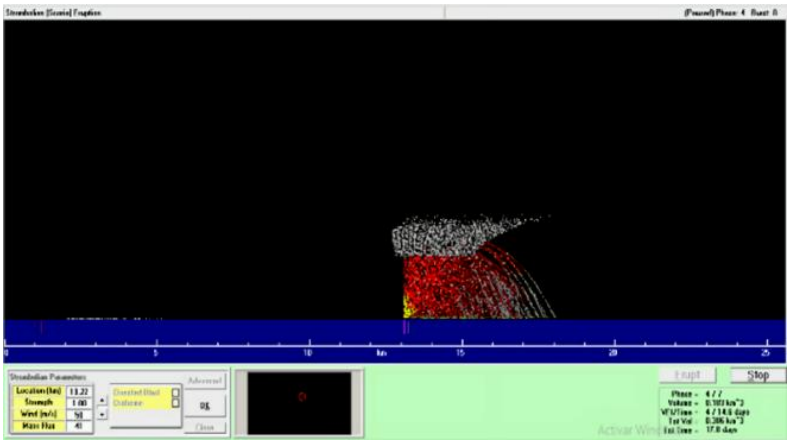


Figura 20: 7 de noviembre del 2024, última actividad.

Análisis general de las zonas de estudio

Se identificó y delimitó la zona de estudio; para llevar a cabo esta delimitación, se comenzó con la identificación de los 35 municipios que integran la zona. El perímetro de esta área se trazó utilizando el mapa digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI,2022), una herramienta confiable para obtener datos geoespaciales detallados en México. El perímetro trazado fue transferido al software libre Google Earth, lo cual permitió una visualización de la zona. En esta plataforma de uso libre, se generó una nube de 770 puntos que delimita el área de estudio. Estos puntos se distribuyeron estratégicamente para obtener toda la cobertura de las zonas. Los archivos generados en Google Earth se exportaron en formatos KML y KMZ, los cuales fueron procesados con el software de uso libre Global Mapper. Esta herramienta facilitó la obtención de los datos de las alturas de cada uno de los puntos en coordenadas geográficas y UTM. A través de este proceso de conversión, se lograron obtener las coordenadas XYZ de cada punto en la nube generada, datos esenciales para poder realizar los modelos matemáticos siguientes.

Análisis de pendientes y variables meteorológicas.

Se analizaron diversos datos correlacionados con las pendientes de la zona de estudio, usando coordenadas UTM, la pendiente, que mide la inclinación en metros de una superficie, se define como la relación entre la diferencia de altura (o desnivel) entre dos puntos y la distancia horizontal entre ellos. Esta relación es equivalente a la tangente del ángulo que forma la línea de medición respecto al eje X, indicando la inclinación de la superficie. La pendiente se expresa como el cambio de altura dividido por la distancia horizontal, representado en la siguiente formula:

$$\text{Pendiente} = \frac{\text{Diferencia de alturas}}{\text{Distancia horizontal}} \times 100 \quad (2)$$

y es fundamental para evaluar el riesgo de colapso en estructuras.

Utilizando las coordenadas UTM (XYZ), se aplicó la fórmula de distancia para cada uno de los 770 puntos.

Una vez calculadas las distancias entre cada punto, se procedió a aplicar la fórmula de la pendiente, utilizando los valores de la coordenada Z y la distancia

correspondiente entre cada uno de los puntos.

Al analizar los resultados de las pendientes, identificamos los puntos con los valores más altos y bajos dentro de la zona de estudio, así como sus ubicaciones exactas. Además, el signo de los valores obtenidos indica la dirección de la inclinación, lo cual nos permite ubicar con precisión las áreas con mayor probabilidad de colapso estructural. Esta información facilita una evaluación de riesgo más detallada, destacando que los puntos de mayor pendiente se encuentran principalmente en la zona sur de la región estudiada, donde se concentra la mayor probabilidad de colapso estructural (tabla 5).

Tabla 5. Resultados del análisis de variables de temperatura y precipitación para primavera de los años 2000 al 2010.

Datos promedio			Primavera 2000-2010		Primavera 2010-2020		Primavera 2020-2024	
Estación	XUTM	YUTM	TEM PROM	PREP PROM	TEM PROM	PREP PROM	TEM PROM	PREP PROM
21248-PUEBLA (DGE)	582,532.81	2,103,685.66	21.05	30.35	20.36	162.18	20.36	25.62
21035-PUEBLA(DGE)	584,926.65	2,102,405.39	19.37	31.34	20.35	30.09	20.35	26.25
21065-PUEBLA(OBS)	587,684.43	2,106,567.99	19.67	30.35	20.00	27.64	20.00	25.62
29170-SAN PABLO DEL MONT	586,744.49	2,113,736.48	17.36	38.08	17.19	49.37		
21247-CHOLULA	571,746.45	2,108,338.64	18.68	25.85	19.24	22.90	17.19	23.40
21034-ECHEVERRIA	576,298.78	2,096,066.54	17.38	22.40	17.83	30.10	19.24	36.81
21249-AFRICAM ZAFARI	591,077.09	2,094,288.81	21.73	38.23	19.37	39.79	17.83	38.94
29169-ZACATELCO	579,363.00	2,125,281.00	17.64	31.16	17.05	45.39	19.37	33.80
29150 - TEOLOCHOLCO	583,042.00	2,127,950.00	18.25	34.99	18.21	33.36	17.05	95.64
29161 - ACXOTLA DEL MONTE	588,373.00	2,127,351.00	16.38	28.81	16.99	30.33	18.21	14.78
21242 - CAPULAC	598,941.00	2,111,389.00	17.90	38.42	18.26	36.84	16.99	78.03
21136 - ACAJETE	609,799.00	2,113,602.00	14.98	44.44	16.41	50.82	18.26	52.45

Fuente: elaboración propia sobre datos obtenidos de las alturas y cálculos de gravedad sobre cada punto.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en la investigación destacan la interacción entre factores climáticos, geológicos y antrópicos, subrayando los riesgos ambientales (climáticos) que afectan a la zona metropolitana de Puebla. Los patrones identificados en los datos históricos del SMN y CONAGUA reflejan un aumento significativo en la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos. Este incremento puede atribuirse a la sinergia entre el calentamiento global y las dinámicas locales que sistemáticamente provocan un aumento estadístico en los fenómenos, alterando incluso el ciclo hídrico.

En el análisis general, el uso de modelos matemáticos y herramientas como Surfer permitieron representar los resultados para así poder tener una visualización y análisis detallado de variables clave. La correlación inversa entre altura y gravedad, detectada en las zonas de mayor elevación, demuestra la vulnerabilidad de estas áreas a fenómenos como deslizamientos de tierra. Esta demostración confirma la importancia de incluir la topografía en la planificación de estrategias de gestión de riesgos, resaltando la necesidad de medidas preventivas específicas en regiones montañosas.

Adicionalmente, los estudios sobre el volcán Popocatépetl revelan avances de importancia en la comprensión de su dinámica eruptiva. El análisis estadístico y la clasificación de los sismos volcánicos ofrecen modelos predictivos valiosos. Estos modelos no solo proporcionan herramientas esenciales para prever erupciones, sino que también fortalecen la capacidad de respuesta ante eventos volcánicos, protegiendo a las comunidades vulnerables cercanas. El estudio desarrollado dio como resultado la obtención de cartográfica del comportamiento de isolíneas de ondas sísmicas de velocidades (isocinéticas) y arribo (isócronas) de ondas sísmicas primarias (P) y secundarias (S), información analizada y procesada de las zonas de rompimiento técnico de los Estados con mayor actividad (Chiapas, Guerrero, Michoacán, Jalisco, Oaxaca y Colima), y que pudieran afectar principalmente a la Capital y Mixteca del estado de Puebla, es decir la distancia de los puntos de rompimiento y el tiempo de arribo de las ondas en forma general al estado de Puebla.

Los resultados procesados y obtenidos durante la investigación son los siguientes:

a.- Cálculo de tiempo de llegada de ondas sísmicas primarias y secundarias con datos de distancia y velocidad de onda, provenientes de las zonas de estudio (Guerrero, Chiapas, Michoacán, Jalisco, Oaxaca y Colima) arribando a la región de estudio, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6: Tiempo de llegada de ondas P y S generadas en hojas de cálculo, tomando en cuenta los lugares de origen, punto de llegada, los diferentes medios geológicos, distancias y velocidades de las ondas.

Guerrero			
		Tiempo de llegada (seg.)	
Distancia	**Medio**	**Onda primaria**	**Onda secundaria**
319,702	Basalto	49.953438	148.698605
319,702	Granito	61.481154	106.567333
319,702	Arenisca	91.343429	148.698605
319,702	Calizas	133.209167	236.816296
Chiapas			
		Tiempo de llegada (seg.)	
Distancia	**Medio**	**Onda primaria**	**Onda secundaria**
804,948	Basalto	125.773125	374.394419
804,948	Granito	154.797692	268.316000
804,948	Arenisca	229.985143	374.394419
804,948	Calizas	335.395000	596.257778
Oaxaca			
		Tiempo de llegada (seg.)	
Distancia	**Medio**	**Onda primaria**	**Onda secundaria**
299,368	Basalto	46.776250	139.240930
299,368	Granito	57.570769	99.789333
299,368	Arenisca	85.533714	139.240930
299,368	Calizas	124.736667	221.754074
Michoacán			
		Tiempo de llegada (seg.)	
Distancia (m)	**Medio**	**Onda primaria**	**Onda secundaria**
523,415	Basalto	81.783594	243.448837
523,415	Granito	100.656731	174.471667
523,415	Arenisca	149.547143	243.448837
523,415	Calizas	218.089583	387.714815
Jalisco			
		Tiempo de llegada (seg.)	
Distancia	**Medio**	**Onda primaria**	**Onda secundaria**
670,452	Basalto	104.758125	311.838140
670,452	Granito	128.933077	223.484000
670,452	Arenisca	191.557714	311.838140
670,452	Calizas	279.355000	496.631111
Colima			
		Tiempo de llegada (seg.)	
Distancia	**Medio**	**Onda primaria**	**Onda secundaria**
644,043	Basalto	100.631719	299.554884
644,043	Granito	123.854423	214.681000
644,043	Arenisca	184.012286	299.554884
644,043	Calizas	268.351250	477.068889

b.- Estados con mayor actividad sísmica con arribo de ondas sísmicas primarias y secundarias en segundos mínimos y máximos aproximadamente, que impactarían al área de estudio.

- Guerrero, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 49,953 segundos mínimos y 133.209 máximos. Ondas secundarias 106,567 segundos mínimos y 236,816 máximos.

- Chiapas, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 125,773 segundos mínimos y 335,395 máximos. Ondas secundarias 268,316 segundos mínimos y 596,257 máximos.

- Oaxaca, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 46,776 segundos mínimos y 124,736 máximos. Ondas secundarias 99.789 segundos mínimos y 221,754 máximos.

- Michoacán, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 81,783 segundos mínimos y 218,089 máximos. Ondas secundarias 174,471 segundos mínimos y 387,714 máximos.

- Jalisco, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 104.758 segundos mínimos y 279.355 máximos. Ondas secundarias 223.484 segundos mínimos y 496,631máximos.

- Colima, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 100.6318 segundos mínimos y 268,351 máximos. Ondas secundarias 214.681 segundos mínimos y 477.069 máximos.

c.- Estados con mayor actividad sísmica con arribo de ondas sísmicas primarias y secundarias en segundos mínimos y máximos aproximadamente, que impactarían a la zona de estudio; específicamente a la Mixteca.

- Guerrero, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 32.500 segundos mínimos y 86.669 máximos. Ondas secundarias 69.335 segundos mínimos y 154.078 máximos.

- Chiapas, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 115.688 segundos mínimos y 308.502 máximos. Ondas secundarias 246.802 segundos mínimos y 548.443 máximos.

- Oaxaca, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 32.201 segundos mínimos y 85.870 máximos. Ondas secundarias 68.696 segundos mínimos y 152.658 máximos.

- Michoacán, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 84.956 segundos mínimos y 226.550 máximos. Ondas secundarias 181.240 segundos mínimos y 402.756 máximos.

- Jalisco, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 108.921 segundos mínimos y 290.456 máximos. Ondas secundarias 232.365 segundos mínimos y 516.366 máximos.

- Colima, tiempo de llegada de ondas Primarias es de 104.365 segundos mínimos y 278.308 máximos. Ondas secundarias 222.646 segundos mínimos y 494.769 máximos.

Conclusiones

El trabajo integra principalmente el análisis geodinámico terrestre y atmosférico en el estado de Puebla, en México, analizando y correlacionando principalmente los efectos en la zona metropolitana, mostrando que es muy probable que los cambios meteorológicos sean producto de un calentamiento global y las variaciones geológicas en la región. A partir de los datos obtenidos, se

observa que el aumento en la frecuencia de fenómenos extremos, como las “islas de calor”, el "gradiente adiabático seco¿ los eventos de “El Niño” y “La Niña” pudieran estar correlacionados.

Por otra parte, la clasificación y análisis de los modelos volcánicos que se analizaron son fundamentales para entender la dinámica del volcán y predecir posibles comportamientos eruptivos, el volcán Popocatépetl es uno de los volcanes más activos de México y al realizar los modelos nos ayuda a comprender, entender y predecir si fuera el caso, la tendencia eruptiva del volcán en sus en diferentes áreas de estudio. El desarrollo del análisis de la llegada de ondas sísmicas para el estado de Puebla de forma general en cuanto al tiempo de arribo propone una manera práctica y general de cálculos que puedan contribuir para tener una idea del tiempo en que se pudiera percibir un movimiento en la zona metropolitana del Estado, y por tanto que tiempo se tendría aproximado de poder ponerse a resguardo.

El análisis y los resultados del tiempo de llegada de las ondas sísmicas primarias y secundarias desde los diferentes Estados con mayor actividad sísmica que impactarían a Puebla Capital pretenden contribuir de alguna forma a los sistemas de Protección Civil con datos importantes en cuanto a poder poner a parte de la población a salvo. Así, este trabajo resulta crucial para la planificación y gestión del riesgo en la región, brindando una base sólida para decisiones enfocadas en mitigar desastres naturales, proteger a las comunidades vulnerables y proponer medidas de adaptación ante los efectos crecientes del cambio climático y dinámica terrestre en el estado de Puebla.

En conjunto, los resultados obtenidos no solo validan la metodología utilizada, sino que también ofrecen información crucial para la toma de decisiones en políticas de gestión meteorológica y mitigación de riesgos. Sin embargo, se deben considerar las limitaciones inherentes al alcance del estudio, como la dependencia de datos históricos y la posible variabilidad de las condiciones futuras. En conclusión, esta investigación refuerza la importancia de abordar los riesgos naturales meteorológicos y terrestres desde un enfoque multidisciplinario. Los resultados no solo contribuyen al entendimiento del posible cambio climático y sus implicaciones locales, sino que también sientan las bases para la implementación de estrategias efectivas de adaptación y mitigación en el estado de Puebla al contar con información relativa al tiempo de arribo de ondas sísmicas para el mismo Estado.

El conjunto de datos meteorológico, utilizados y analizados durante el estudio están disponibles en el SMN (Servicio Meteorológico Nacional), https://smn.conagua.gob.mx/es/8-smn-general

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado de la BUAP, por el apoyo otorgado al proyecto 00560-PV/2025.

Literatura citada

[1] CENAPRED (2020). Mapa Nacional de Susceptibilidad por inestabilidad de laderas. http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/inestabilidad-laderas.html

[2] CONAPO (2010). Mapa zona metropolitana no. 34. http://conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/zonas_metropolitanas_2010/mapas/ZM34.pdf

[3] GEOEAS (Geographic and Environmental Analysis System). (1992). Versión 3.0 [Software]. Departamento de Geografía, Universidad de California

[4] Golden Software. (2023). Surfer (Version 22.0) [Software]. https://www.goldensoftware.com/products/surfer

[5] INEGI. (2022). Mapa Digital de México en línea. https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/

[6] Máximo Romero, P., Ramos Aguilar, R., Galindo López, V., Ávila Cruz, M., Yáñez Pérez, G., Márquez Máximo, R. & Covarrubias Salvatori, V. (2021). Análisis técnico geoestadístico de los ríos Atoyac y Alseseca que atraviesan la ciudad de Puebla, México. Revista Contactos. 119, 5-22. https://contactos.izt.uam.mx/

[7] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Narciso Hernández, J., Mirón Morales, M., & Beltrán Cruz, M. (2012). Geostatistical study for getting the local gravity, slope, and hydrologic calculations of the Xaltelulco, Tepeloncocone, Tenepanco, Colorada y Quimichule canyons from Popocatépetl volcano. Atmospheric and Climate. Sciences, 31, 65–84. https://doi.org/10.4236/ijg.2016.75054

[8] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Soto Cruz, B., Alcántara Iniesta, S., & Pérez Luna, J. (2013). Analysis of the meteorological variables for Puebla City 2011–2012 applying the modeling ion-wavelets in a hypothetical manner. Atmospheric and Climate Sciences, 3(4), 450–458. https://doi.org/10.4236/acs.2013.34046

[9] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Vázquez García, M. de la C., Martínez Ortiz, A. G., Hernández Andrade, D., & Benítez Ramírez, D. M. (2020). Estudio cartográfico del volcán Popocatépetl, Puebla, México: Volumen edificio volcánico, aceleración de la gravedad y zonas de riesgo para la población. Contactos. Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería, 115, 37–52. https://contactos.izt.uam.mx/index.php/contactos/article/view/5

[10] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Ávila Cruz, M., Galindo López, V., Ramírez Álvarez, M. de los D., Cárdenas López, L., Morales González, A. E., Vázquez García, M. de la C., & Covarrubias Salvatori, V. (2024). Geoscientific analysis of structural collapses in the city of Juan C. Bonilla, Puebla, Mexico (2021). Geographical Journal of Central America. https://doi.org/10.15359/rgac.72-1

Cuando la física y la medicina laten al mismo ritmo

Dr. Jesús Enrique Escalante Martínez
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Estudiante María José Mora Montoya
Facultad de Medicina, Universidad Veracruzana

Fotografía obtenida de colección personal

Abstract
This article examines the connection between electricity, cardiovascular physiology, and mathematical modeling from a historical-scientific perspective. Starting with 18th-century literary and experimental contexts, it explores cardiac function as a dynamic system modeled through electrical analogies, focusing on the Windkessel model and its extension via fractional derivatives. It reviews the role of ventricular assist devices (LVADs) in heart failure patients and the technical challenges they face. Finally, it shows how physics, engineering, and advanced calculus together enable accurate representation of both normal physiology and various cardiac pathologies.

Keywords: Windkessel model, Fractional derivatives, Ventricular assist, Electrophysiology, Pressure-volume loop

Resumen
Este artículo analiza el vínculo entre electricidad, fisiología cardiovascular y modelado matemático desde una perspectiva histórico-científica. Partiendo del contexto literario y experimental del siglo XVIII, se abordan los fundamentos del funcionamiento cardíaco como sistema dinámico modelado mediante analogías eléctricas, destacando el modelo Windkessel y su extensión mediante derivadas fraccionarias. Se revisa el papel de los dispositivos de asistencia ventricular (LVAD) en pacientes con insuficiencia cardíaca, así como los retos técnicos que enfrentan. Finalmente, se muestra cómo la integración de física, ingeniería y cálculo avanzado permite representar de manera precisa tanto la fisiología normal como distintas cardiopatías.

Palabras clave: Modelo Windkessel, Derivada fraccionaria, Asistencia ventricular, Electrofisiología, Ciclo presión-volumen

De Frankenstein al corazón asistido electrónicamente

En 1818, Mary Shelley sorprendió al mundo con su novela *Frankenstein* o el *moderno Prometeo* (Shelly, 1818), donde narra la historia de un científico que da vida a una criatura hecha con restos humanos. Aunque la obra se adentra en el género de terror gótico, Shelley advirtió que su relato no distaba tanto de los avances científicos de su época, por lo que también se le puede considerar como una de las primeras obras de ciencia ficción. Por entonces, los límites entre la vida, la electricidad y la anatomía empezaban a difuminarse bajo la influencia de descubrimientos asombrosos.

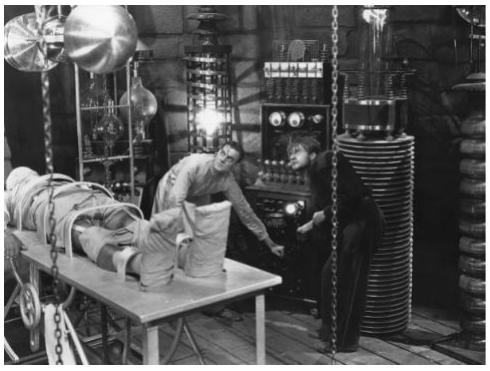


Figura 1: Escena de la película Frankenstein, donde utiliza electricidad para devolverle la vida a la criatura. Fuente: Whale (1931).

Uno de los protagonistas reales de esta revolución científica fue Luigi Galvani (1737–1798), médico, físico y biólogo italiano.

Trabajando en la Universidad de Bolonia, Galvani observó en 1780 que las ancas de una rana podían contraerse al ser estimuladas con una chispa eléctrica. Su hallazgo, al cual llamó: "electricidad animal", sentó las bases de la electrofisiología y mostró, por primera vez, que la electricidad podía provocar movimiento en tejidos vivos.

Casi en paralelo, en Inglaterra, otro pionero experimentaba con fenómenos similares. Erasmus Darwin (1731–1802), médico, naturalista y poeta (y abuelo de Charles Darwin), fue miembro de la prestigiosa Lunar Society y ejerció en la región de Midlands. Fascinado por la idea de animar tejidos muertos, Darwin escribió sobre la posibilidad de revivir materia inerte mediante estimulación eléctrica. Aunque sus experimentos no alcanzaron la fama de los de Galvani, su influencia en los círculos científicos y literarios fue profunda (incluyendo, según se sugiere, a la propia Mary Shelley).

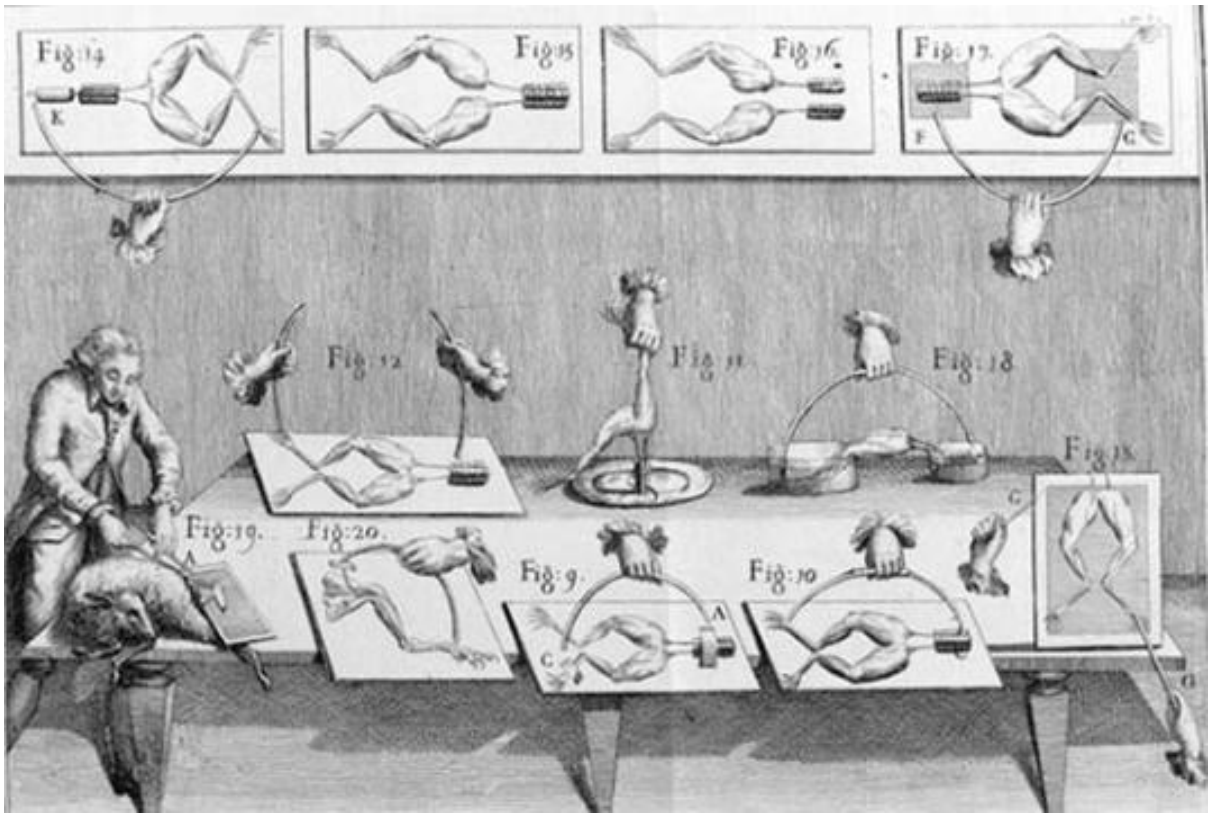


Figura 2: Grabado ilustrando la teoría del galvanismo según los experimentos de Luigi Galvani. Fuente: Galvani (1792).

Estos experimentos de finales del siglo XVIII capturaron la imaginación de una sociedad que apenas empezaba a comprender la naturaleza íntima de la vida. También sembraron una semilla duradera: la idea de que la vida (o al menos su movimiento) podía modelarse, controlarse e incluso replicarse mediante principios físicos.

Hoy, dos siglos después, esa antigua conexión entre física y medicina sigue más viva que nunca. De hecho, actualmente no solo sabemos que

el corazón humano late gracias a impulsos eléctricos, sino que podemos asistir su funcionamiento mediante dispositivos mecánicos controlados electrónicamente. En particular, el desarrollo de modelos matemáticos que describen el comportamiento del sistema cardiovascular, vistos como análogos de circuitos eléctricos, ha permitido avances notables en el diseño de corazones artificiales y dispositivos de asistencia ventricular.

Dispositivos de asistencia ventricular.

Para pacientes con insuficiencia cardíaca terminal, el trasplante de corazón sigue siendo la solución más efectiva. Sin embargo, la realidad es desgarradora: en promedio, los candidatos esperan más de 300 días por un donante, y hasta un 30% fallece antes de recibirlo. Ante esta urgencia, la medicina ha puesto su mirada en una tecnología capaz de sostener la vida mientras llega ese momento crucial. Los dispositivos de asistencia ventricular son máquinas diseñadas para suplir, de manera parcial o total, la función de un corazón enfermo.

Entre estos dispositivos destaca el LVAD (Dispositivo de Asistencia Ventricular Izquierda, por sus siglas en inglés. Left Ventricular Assist Device), un sistema mecánico que actúa como compañero incansable del corazón: se conecta al ventrículo izquierdo para ayudarlo a bombear sangre cuando este ya no puede hacerlo solo. Existen dos generaciones de esta tecnología. Las primeras, las bombas pulsátiles, las cuales imitan fielmente el latido natural del corazón, generando pulsos rítmicos de presión y flujo sanguíneo. Las más modernas, las bombas rotatorias de flujo continuo son una maravilla de miniaturización: más pequeñas, silenciosas y eficientes, funcionan con una hélice que gira sin pausa, impulsando la sangre de manera constante. Estas últimas se han convertido en la opción preferida, no solo por su tamaño reducido que facilita la implantación, sino porque permiten a los pacientes recuperar algo invaluable: la normalidad. Su verdadera revolución no está en los cables o motores, sino en devolver a las personas la posibilidad de abrazar a sus seres queridos, retomar su trabajo o simplemente pasear al aire libre mientras esperan un trasplante o, en algunos casos afortunados, hasta que su propio corazón recupera la fuerza suficiente para latir por sí mismo. (Simaan, 2009).

Los retos a superar.

El talón de Aquiles de las bombas rotatorias es su controlador de velocidad. Este pequeño cerebro electrónico debe ajustar la rotación del impulsor en tiempo real, adaptándose a actividades cotidianas como caminar, dormir o incluso situaciones de estrés. Sus retos son titánicos: evitar el retroceso (backflow) y prevenir el colapso (succión). Si la velocidad es muy baja, la sangre puede regurgitar de la aorta al ventrículo, desafiando el propósito del dispositivo, a eso se le llama retroceso. Por otra parte, si la velocidad es excesiva, el ventrículo podría colapsar al vaciarse abruptamente, dañando el tejido cardíaco, a eso se le llama succión.

La meta final es clara: lograr que el LVAD opere con la precisión de un órgano biológico, permitiendo a sus usuarios no solo sobrevivir, sino vivir con autonomía. Así como en un coche moderno el sistema crucero acelera o frena para mantener una velocidad constante, el controlador del LVAD ajusta la bomba para que el corazón artificial reconozca las necesidades del

cuerpo y responda sin fallar.

En las siguientes secciones, exploraremos cómo la dinámica del corazón puede representarse mediante circuitos, cómo el flujo y la presión sanguínea se modelan de forma análoga a corriente y voltaje, y por qué las matemáticas modernas, en especial el cálculo fraccionario, ofrecen una herramienta poderosa para comprender no solo la fisiología normal, sino también diversas enfermedades cardíacas.

La forma del latido refleja la salud del corazón

Cada latido del corazón es una secuencia bien coordinada de contracción y relajación. Esta coreografía se refleja con gran claridad en el ciclo presión-volumen, el cual es una herramienta gráfica que permite visualizar cómo cambian la presión y el volumen en el ventrículo izquierdo a lo largo de un latido. El ciclo completo se compone de cuatro fases:

1. El **llenado diastólico**, cuando el corazón se relaja y recibe sangre.

2. La **contracción isovolumétrica**, donde se acumula presión sin que salga sangre.

3. La **eyección sistólica**, en la que la sangre es impulsada hacia la aorta.

4. Y la **relajación isovolumétrica**, que prepara al corazón para volver a llenarse.

Estas fases están organizadas en dos etapas principales: **sístole** (cuando el corazón se contrae) y **diástole** (cuando se relaja). Al representar estas variables en un gráfico, el resultado es un lazo cerrado cuya forma varía de manera sensible según el estado de salud del corazón. (Figura 3)

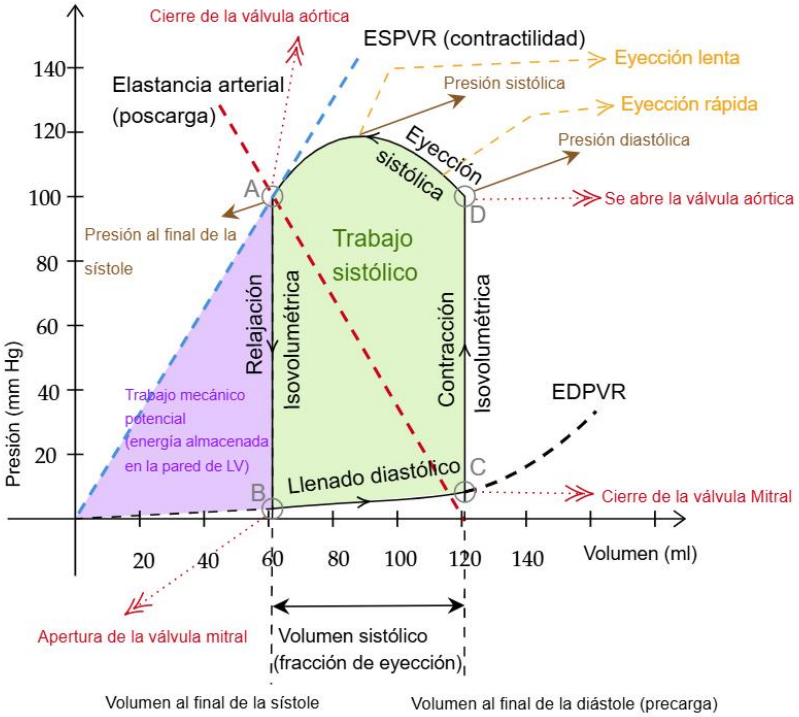


Figura 3: Ciclo Presión-Volumen (PV-loop) normal con eventos clave marcados.

Distintas enfermedades cardíacas alteran la forma del ciclo presión-volumen de maneras características. A continuación, mostramos una clasificación de las cardiopatías y una breve descripción de cada una.

Problemas valvulares:

- Estenosis mitral: Dificulta el llenado, reduciendo EDV y trabajo cardíaco.
- Insuficiencia mitral: La sangre retrocede, borrando las fases isovolumétricas y reduciendo la eficiencia.
- Estenosis aórtica: Obliga al corazón a generar presiones extremas, elevando ESV y reduciendo SV.
- Insuficiencia aórtica: La sangre vuelve al ventrículo, aumentando EDV y sobrecargando el corazón.

Fallas del músculo cardíaco:

- Disfunción sistólica: El corazón no se vacía bien (ESV alto), desplazando el ciclo a la derecha con menor contractilidad.
- Disfunción diastólica: El ventrículo rígido dificulta el llenado (EDV alto, pero SV bajo), estrechando el ciclo.

Así, el ciclo presión-volumen no solo muestra el funcionamiento del corazón sano, sino que también se convierte en una herramienta visual poderosa para detectar y comprender las patologías cardíacas. La forma del lazo, en efecto, refleja la forma del latido, y, por tanto, la salud del corazón.

Con esta imagen clara del ciclo cardíaco en mente, surge una pregunta fascinante: ¿Es posible describir este comportamiento tan complejo utilizando las leyes de la electricidad?

La respuesta, aunque sorprendente, es afirmativa. Aunque el corazón es, ante todo, una bomba mecánica, su funcionamiento puede modelarse de manera notablemente precisa como un circuito eléctrico. Este enfoque nos conduce a los modelos eléctricos análogos del sistema cardiovascular, entre los cuales destaca el clásico modelo Windkessel.

El corazón como un circuito eléctrico: el modelo Windkessel

A simple vista, el corazón parece muy distinto al de un circuito eléctrico. Sin embargo, cuando los médicos e ingenieros tratan de entender y predecir su funcionamiento, descubren que la física que gobierna un sistema eléctrico y un sistema cardiovascular no es tan diferente. Así nació una de las analogías más poderosas en medicina: el modelo Windkessel.

¿Qué es el modelo Windkessel?

En alemán, la palabra *Windkessel* significa çámara de aire". Originalmente, se refería a dispositivos que, en antiguas bombas de agua, ayudaban a suavizar el flujo para que fuera más continuo. Inspirados en esta idea, en 1899 el médico alemán Otto Frank propuso un modelo similar para entender cómo la aorta, la gran arteria que sale del corazón,

amortigua las pulsaciones y mantiene un flujo sanguíneo relativamente estable. (Frank, O., 1899).

El modelo Windkessel considera que el sistema cardiovascular puede describirse mediante tres componentes básicos, muy similares a los de un circuito eléctrico: Resistencia (R), Compliancia (C), Inercia (L). Con estos tres elementos, el corazón y los vasos principales pueden modelarse como un sistema dinámico donde la presión y el flujo de sangre obedecen ecuaciones muy parecidas a las que describen voltajes y corrientes en un circuito. En la Tabla 1 se muestran de forma sintética estos y otros conceptos útiles para comprender las ecuaciones.

Tabla 1: Analogía Eléctrico-Fisiológica.

Eléctrico	**Fisiológico**
Resistencia (R)	Oposición al flujo en vasos
Compliancia (C)	Elasticidad de la aorta
Inductor (L)	Inercia de la sangre
Corriente ($I(t)$)	Flujo sanguíneo
Voltaje ($P(t)$)	Presión arterial

Para comenzar se debe tener claro el significado de algunos símbolos. La notación $f(t)$ indica que la función depende del tiempo t Su derivada respecto al tiempo se escribe como

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

y representa su tasa de cambio. Finalmente, vamos a utilizar la Tabla 1 para identificar las variables pertinentes en la modelación. La versión más simple (el modelo Windkessel de dos elementos) se puede escribir así:

$$I(t) = \frac{P(t)}{R} + C\frac{dP(t)}{dt}$$

Aquí, $I(t)$ representa el flujo de sangre (análoga a una corriente eléctrica), $P(t)$ es la presión en la aorta (como un voltaje), R la resistencia del sistema vascular y C la elasticidad de la aorta. En su versión más general (más realista) se puede incluir la inercia de la sangre mediante una inductancia L. Entonces la ecuación (1) puede ser escrita como:

$$(1+\frac{r}{R})I(t) + (rC + \frac{L}{R})\frac{dI(t)}{dt} + LC\frac{d^2I(t)}{dt^2} = \frac{P(t)}{R} + C\frac{dP(t)}{dt} \quad (2)$$

Donde r, es la resistencia del flujo aórtico proximal, modela la impedancia característica del tracto de salida del

corazón. El verdadero valor del modelo es su capacidad para anticipar cómo reaccionará un corazón ante diferentes situaciones, desde correr hasta dormir. En otras palabras, el corazón no solo late: resuelve ecuaciones diferenciales mientras lo hace.

Sin embargo, estas ecuaciones diferenciales ordinarias, aunque elegantes en su formulación clásica, enfrentan limitaciones al modelar la intrincada geometría autosimilar del sistema vascular cardíaco, donde patrones fractales se repiten a múltiples escalas. Para capturar esta complejidad biológica, además de los efectos de memoria en el sistema, investigaciones recientes utilizan derivadas fraccionarias (una generalización del cálculo convencional) las cuales permiten describir cómo la dinámica del flujo sanguíneo recuerda su historia pasada mientras interactúa globalmente con la red capilar (Escalante-Martínez, 2025). Los modelos en derivadas fraccionarias son capaces de reflejar diferentes cardiopatías con menos parámetros respecto a los modelos con derivadas clásicas. Este salto matemático no solo enriquece los modelos existentes, sino que revela que el corazón, en su esencia, resuelve ecuaciones aún más profundas de las que imaginamos.

Una criatura eléctrica

Frankenstein no era solo una fantasía gótica, sino un presagio. Hoy, los dispositivos que asisten al corazón no distan tanto del sueño decimonónico de reanimar lo inerte. Como imaginó Shelley, como exploró Galvani en su laboratorio, o como especuló Darwin en sus poemas y cartas, la frontera entre vida, electricidad y ánima biotecnológica se ha vuelto difusa. La física, la ingeniería de control y la matemática que hay de fondo en ambas han ampliado la comprensión del corazón moderno, ya no es simplemente un músculo que late, sino un sistema dinámico complejo que puede ser modelado, asistido y controlado con precisión para restaurar su función vital cuando así se requiere. En esta sinfonía de impulsos y ecuaciones, la medicina no juega a vencer la muerte sino a prolongar con dignidad el milagro de cada latido. Cuando decimos milagro parafraseamos una cita comúnmente atribuida a Erasmus Darwin: “Lo que llamamos milagro es física aún no escrita”.

Referencias

[1] Frank, Otto. “Die grundform des arteriellen pulses”. *Zeitung fur Biologie*, 37, 483-586. 1899. [1a] Frank, Otto. “The basic shape of the arterial pulse. First treatise: Mathematical analysis.” *Journal of Molecular and Cellular Cardiology*, vol. 22, no. 3, 1990, pp. 255-277. *Journal of Molecular and Cellular Cardiology*, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022282890914600. Accessed23052025.

[2] Shelly, Mary. *Frankenstein, or the Modern Prometheus.* London, England, Lackington, Hughes, Harding, Mavor & Jones, 1818.

[3] Simaan, M. A. **Rotary heart assist devices.** Springer Handbook of Automation, 2009. Springer Nature Link, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-78831-7_79. Accessed23052025.

[4] Escalante-Martínez, J.E., Guel-Cortez, AJ., Félix, L., Méndez-Barrios, C.F. (2025). From Self-similar Networks to Fractional Systems. A Formal Introduction. Advances in Fractional Calculus. Modeling and Optimization in Science and Technologies, vol 21. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-83989-4_2

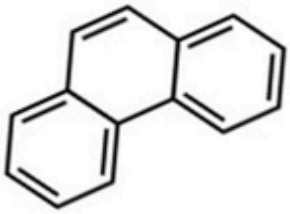
Referencias de las figuras:

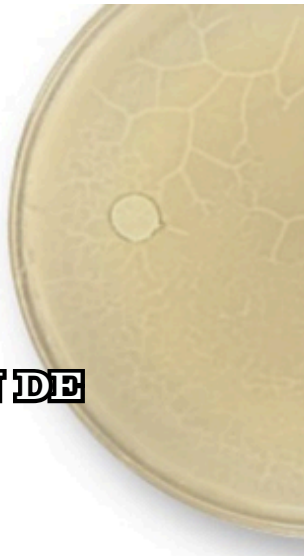
Galvani, L., De viribus electricitatis in motu musculari commentarius, Bolonia, 1792.

Whale, J., Frankenstein, Universal Pictures, Estados Unidos, 1931.

Hall, J. E. y Hall, M. E., Guyton y Hall. Tratado de fisiología médica, 14a ed., Elsevier, España, 2021, p.296.

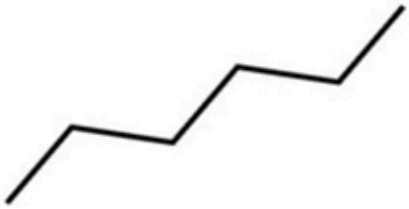






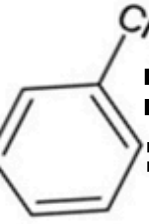
HONGOS Y BACTERIAS PARA LA RESTAURACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS CON PETRÓLEO





M. C. Ana Cecilia Alcala Hernandez
Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dr. Benjamín Abraham Ayíl Gutiérrez
CONACYT, Centro de Biotecnología Genómica, Instituto Politécnico Nacional



Dr. José Alberto Lôpez Santillán
Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dr. Benigno Estrada Drouaillet
Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dra. Diana Laura Peraza Liñan
Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dr. Wilberth Alfredo Poot Poot
Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas





Fotografía obtenida de colección personal

Abstract
Oil is the most widely used fuel source in the world and is composed of a mixture of hydrocarbons, substances formed primarily by carbon and hydrogen. Despite its importance as an energy resource, its handling poses a significant environmental risk. In Mexico, during 2023, Petróleos Mexicanos (PEMEX) reported 1,211 leak and spill events, representing a 3.8% increase compared to 2022, with the Gulf of Mexico being one of the most affected regions. These incidents can severely disrupt ecosystems by damaging flora, fauna, and the quality of water and soil. To mitigate these impacts, physical, chemical, and biological environmental restoration methods have been developed. Among them, bioremediation stands out because it uses microorganisms, such as bacteria and fungi, capable of naturally degrading hydrocarbons. Although this alternative is more environmentally friendly, it still faces challenges related to its efficiency and the time required for its application.

Key words: bioremediation, hydrocarbons, microorganisms, oil contamination.

Resumen
El petróleo es la fuente de combustible más utilizada en el mundo y está compuesto por una mezcla de hidrocarburos, sustancias formadas principalmente por carbono e hidrógeno. A pesar de su importancia energética, su manejo representa un riesgo ambiental significativo. En México, durante 2023, Petróleos Mexicanos (PEMEX) reportó 1211 eventos de fugas y derrames, un 3.8% más que en 2022, siendo el Golfo de México una de las regiones más afectadas. Estos incidentes pueden alterar gravemente los ecosistemas, dañando la flora, la fauna, la calidad del agua y del suelo. Para mitigar estos efectos, se han desarrollado métodos físicos, químicos y biológicos de restauración ambiental. Entre ellos, la biorremediación destaca por utilizar microorganismos, como bacterias y hongos, capaces de degradar hidrocarburos de manera natural. Aunque esta alternativa es más amigable con el ambiente, aún enfrenta desafíos relacionados con su eficiencia y tiempo de aplicación.

Palabras clave: biorremediación, hidrocarburos, microorganismos, contaminación con petróleo.

Introducción

El petróleo o crudo es el combustible más utilizado como fuente de energía a nivel mundial. Este es una mezcla compleja de compuestos químicos a base de carbono e hidrogeno, denominados hidrocarburos, los cuales pueden ser de estructura lineal, ramificados, o de estructura cíclica como los aromáticos entre los que se incluyen al benceno, tolueno, xileno y los hidrocarburos aromáticos policíclicos. Además de los hidrocarburos, el crudo contiene metales pesados como el vanadio (V), níquel (Ni) y plomo (Pb), y no metales como azufre (S), y nitrógeno (N), que se han sido relacionados con efectos tóxicos y cancerígenos en humanos y otros organismos.

De acuerdo con datos del programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, existe la posibilidad de que ocurran anualmente más de 1000 derrames, mucho de ellos con consecuencias ecológicas graves. En México en el 2023, PEMEX reportó que el número total de fugas y derrames ascendió a 1,211 eventos, lo que representa un aumento del 3.8% en comparación con los 1,167 eventos

registrados hasta el 2022, siendo el Golfo de México una de las zonas más vulnerables. Esta situación ha impulsado la necesidad de contar con estrategias más efectivas para la restauración de los sitios contaminados.

Cuando el petróleo entra en contacto con el ambiente debido a derrames durante su extracción, refinamiento, almacenamiento o transporte, ocasiona severos daños a los ecosistemas. La contaminación del suelo, cuerpos de agua y aire se traduce en pérdida de biodiversidad, afectación de la salud humana y alteraciones ecológicas a largo plazo. Por ejemplo, se ha reportado que los derrames de petróleo provocan la muerte de aves marinas, peces, mamíferos, así como la destrucción de hábitats naturales y la perdida de cobertura vegetal.

Para reducir el impacto de la contaminación por petróleo se han desarrollado técnicas para recuperar estos ambientes, categorizándose en física, química y biológicas. Las técnicas físicas, consisten en remover los contaminantes mediante la absorción por bombeo o por el uso de barreras para retirar el petróleo visible, pero la eficiencia de la eliminación del contaminante no es en su totalidad. En las técnicas químicas se usan dispersantes o agentes oxidantes, que aceleran la descomposición del crudo, sin embargo, pueden generar compuestos tóxicos secundarios y su uso excesivo puede alterar el equilibrio ecológico del sitio (Jia-Qi *et al.,* 2020).

Mientras que las técnicas biológicas o biorremediación son una alternativa sostenible, que utiliza microorganismos como bacterias y hongos para degradar los hidrocarburos y son más amigables con el medio ambiente (Peraza-Liñan *et al.,* 2025). ¿Cómo es posible esto?, esto es debido a que las bacterias son microorganismos que tienen en su genoma y en algunos casos en su ADN extracromosomal (plásmidos) genes que codifican enzimas relacionadas con el metabolismo de los hidrocarburos. La biorremediación ha cobrado relevancia como una estrategia eficaz, económica y amigable con el ambiente, lo que ha motivado el aislamiento, evaluación y selección de microorganismos (hongos y bacterias) con potencial degradativo de hidrocarburos. Asimismo, el potencial de las bacterias y hongos se han mejorado por la combinación de estos para dar lugar a la elaboración de los consorcios microbianos. El alcance de este trabajo es dar a conocer la importancia de los microorganismos en la degradación de hidrocarburos presentes en el petróleo para la recuperación de sitios contaminados.

Degradación de hidrocarburos por hongos y bacterias

Los microorganismos como hongo y bacterias son capaces de utilizar los hidrocarburos del petróleo como fuente de energía. Esto es debido a la capacidad que tiene para sintetizar enzimas especializadas que son codificadas por genes presentes en su genoma o en plásmidos (bacterias), dentro de este grupo de enzimas se encuentran las peroxidasas y las monooxigenasas, alcanohidroxilasas, citocromo P450, deshidrogenasas, epóxido hidrolasas y lacasas etc., las cuales se encargan de romper los enlaces químicos de los hidrocarburos para formar moléculas menos toxicas como dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y la producción de biomasa. A pesar de que estos microorganismos comparten ciertas características como la síntesis de enzimas intracelulares (actúan dentro

de las células) y extracelulares (actúan fuera de la célula), presentan diferencias en la degradación de hidrocarburos. Por ejemplo, las bacterias producen enzimas que actúan sobre los alcanos y compuestos aromáticos simples, mientras que los hongos producen enzimas más eficientes para degradar hidrocarburos policíclicos aromáticos (Figura 1; Cuadro 1).

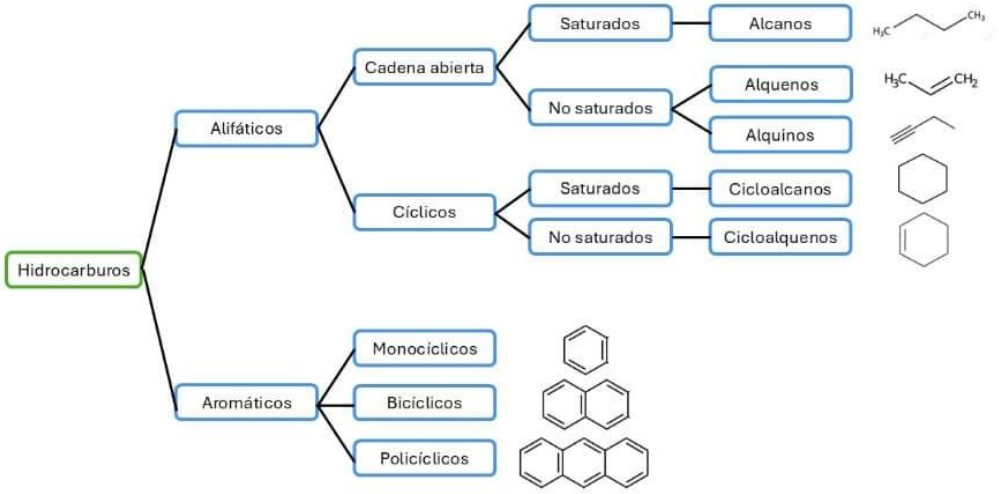


Figura 1: Clasificación de los hidrocarburos de acuerdo con su estructura química.

Género	Tipo microbiano	Compuestos degradados	Referencias
Pseudomonas	Bacteria	Alcanos y compuestos aromáticos	Wu *et al.*, 2018
Bacillus	Bacteria	Alifáticos lineales y ramificados, cicloalcanos y aromáticos	Nurulhuda *et al.*, 2018
Acinetobacter	Bacteria	Alifáticos y aromáticos	Bao *et al.*, 2013
Penicillium	Hongo	Alifáticos, aromáticos e hidrocarburos policíclicos aromáticos	Wolski, 2022
Aspergillus	Hongo	Alifáticos, aromáticos e hidrocarburos policíclicos aromáticos	Al-Dossary *et al.*, 2020
Fusarium	Hongo	Alifáticos, aromáticos e hidrocarburos policíclicos aromáticos	Barnes *et al.*, 2023

Cuadro 1: Hongo y bacterias que degradan hidrocarburos del petróleo.

Una de las rutas más estudiadas en bacterias es la degradación de naftaleno por *Pseudomonas* sp., esta vía está formada por genes del plásmido pNAH7, que codifican para las enzimas naftaleno dioxigenasa, enzima encargada de introducir dos átomos de oxígeno en el anillo aromático para formar cis-dihidrodiol de naftaleno. Luego, mediante una serie de reacciones catalizadas por las deshidrogenasas y dioxigenasas, el compuesto es convertido en salicilaldehído y posteriormente en catecol, que puede ser degradado por la escisión del anillo. Esto permite que los productos finales como piruvato o acetil-CoA entren al ciclo de Krebs, integrando el carbono del contaminante al metabolismo celular (Figura 2).

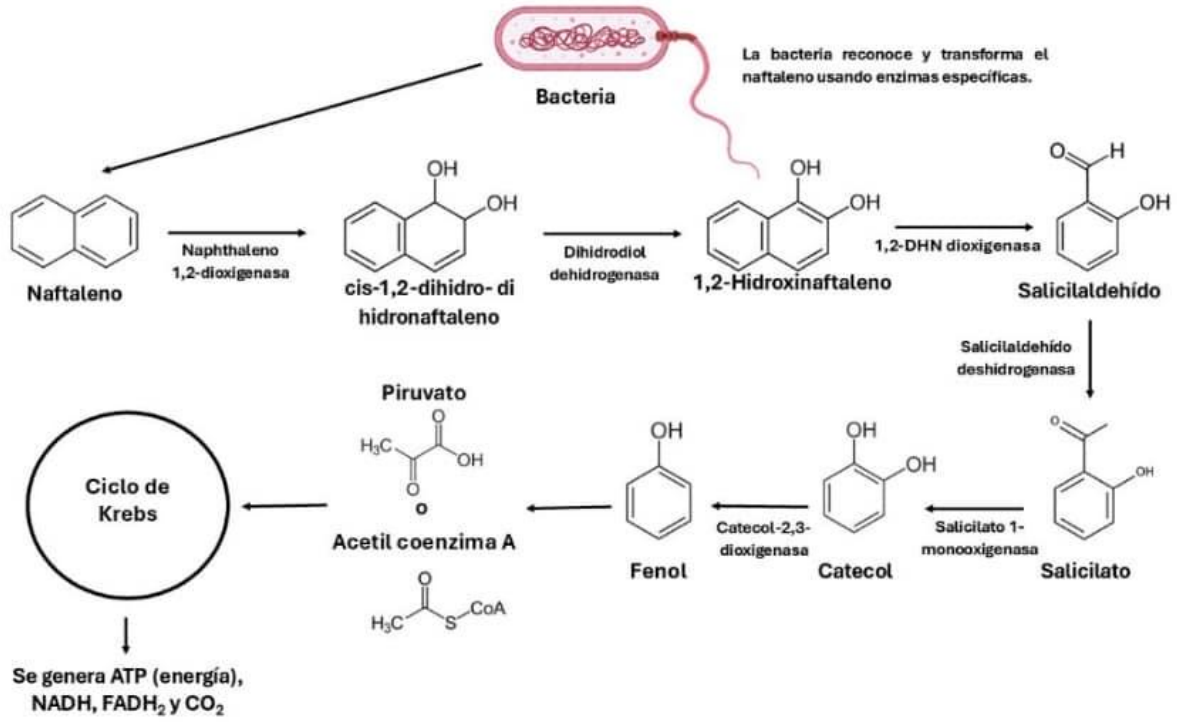


Figura 2: Ruta metabólica de degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos por *Pseudomonas* sp.

En el caso de los hongos filamentosos como *Phanerochaete chrysosporium*, la degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos involucra enzimas extracelulares como lignina peroxidasa, manganeso peroxidasa y lacasa, codificadas en su genoma. Estas enzimas permiten romper enlaces difíciles de oxidar y transformar compuestos tóxicos en moléculas más sencillas como quinonas, ftalatos y finalmente CO_2 (Figura 3).

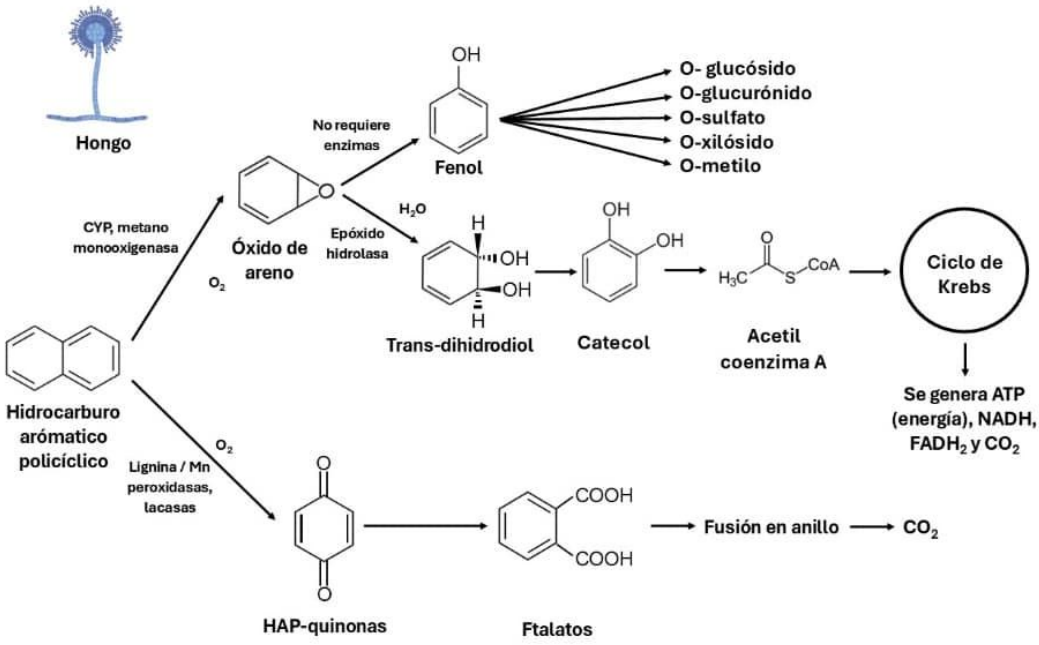


Figura 3: Ruta metabólica de degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos por hongos.

Los microorganismos (bacteria y hongos) además de biosintetizar enzimas, pueden producir biosurfactantes, los cuales son moléculas con propiedades anfifílicas, es decir poseen un extremo con alta afinidad al agua (hidrofílica) y otra con afinidad a grasas, aceites o hidrocarburos (hidrofóbica). Estas moléculas disminuyen la tensión entre el agua y los hidrocarburos del petróleo, permitiendo que estos sean más accesibles para la degradación por los microorganismos (Figura 4).

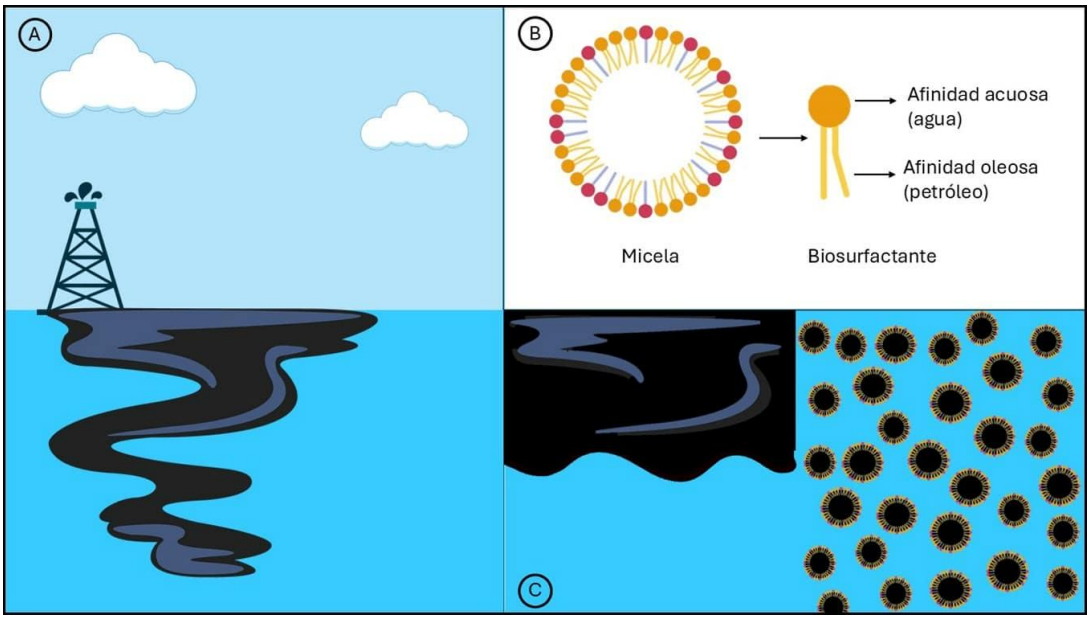


Figura 4: Mecanismo de acción de los biosurfactantes en la disminución de la tensión superficial. A. Derrame de petróleo en ecosistemas acuáticos. B. Estructura de los biosurfactantes. C. Ruptura de la tensión superficial entre la fase acuosa y oleosa (permitiendo la formación de emulsiones).

Factor ambiental	**Hongos**	**Bacterias**
pH	Ácido a neutro (4-7)	Neutro a alcalino (6-8)
Temperatura	20 a 35 °C	20 a 40 °C
Aeración	Aerobios	Aerobias y anaerobias, en condiciones anaerobias son hasta 5 veces más lentas.
Disponibilidad de agua	Necesaria	Necesaria
Nutrientes	Nitrógeno, fósforo y potasio.	Nitrógeno, fósforo y potasio.

Cuadro 2: Condiciones ambientales óptimas para el crecimiento de hongos y bacterias para la degradación de hidrocarburos.

A pesar de que la degradación de los hidrocarburos puede realizarse por hongos y bacterias de manera individual, los estudios indican que son más efectivos los consorcios microbianos (Cuadro 3), es decir, mezclas coordinadas de múltiples bacterias, hongos o de ambas, que actúan sobre distintos componentes del petróleo de manera simultánea. Estos consorcios trabajan como un equipo, unas cepas inician la degradación de moléculas grandes mientras que otras metabolizan los fragmentos intermedios y algunas eliminan los residuos finales, lo que maximiza la eficiencia del proceso. Por ejemplo, el consorcio formado por las bacterias *Pseudoxanthomonas* sp., *Bacillus* sp., *Dietzia* sp. y *Acinetobacter* sp., aisladas de suelos salinos, fue capaz de degradar más del 97% de los hidrocarburos totales en 10 días (Chen *et al.,* 2024, p. 9).

Aplicaciones y desafíos de la biorremediación microbiana

La biorremediación mediante hongos y bacterias ha demostrado ser muy eficaz para limpiar ambientes contaminados con hidrocarburos del petróleo. Por lo que el diseño y uso de consorcios cada día es más común (Cuadro 3), dentro de este contexto se puede ver como la eficiencia de degradación es mejorada con la combinación de cepas fúngicas y bacterianas, entre estas combinaciones se encuentran los hongos *Trichoderma koningiopsis* y *Penicillium janthinellum*, con las *bacterias Serratia marcescens* y *Burkholderia cepacia*, las cuales fueron capaces de eliminar el 91% de los hidrocarburos totales del petróleo (Silva*et al.,* 2024, p. 20). A pesar de esta alta eficiencia, la aplicación de microorganismos en el sitio enfrenta varios desafíos técnicos y regulatorios. Las cepas deben estar adaptadas al sitio contaminado, considerando los factores como pH, humedad del suelo, salinidad y el tipo de suelo. Además, el tiempo necesario puede ser largo en comparación con técnicas fisicoquímicas, que son más rápidas, aunque menos sostenibles.

Consorcio	Microorganismos	Compuestos degradados	Degradación	Referencia
ENZ-G1	**Bacterias** *Chryseobacterium*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Stenotrophomonas*, *Alcaligenes* y *Gordonia* **Hongo** *Trametes gibbosa*	Parafinas lineales n-C_{10} y n-C_{24} presentes en diésel	90.8 %	Zanaroli *et al.*, 2010
Bacillus thuringiensis, B. velezensis y *Stenotrophomonas*	**Bacterias** *Bacillus thuringiensis, B. velezensis y Stenotrophomonas*	Hidrocarburos totales de petróleo (HTP)	99.7%	Okorhi-Dimasa y Tudararo-Aherobo, 2023
T. koningiopsis, S. marcescens y B. cepacia	**Hongo** *Trichoderma koningiopsis* **Bacterias** *Serratia marcescens* y *Burkholderia cepacia*	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) e HTP presentes en diésel	93.6 % HAP y 93.5 % HTP	Silva *et al.*,2024

Cuadro 3: Consorcios microbianos utilizados en la degradación de hidrocarburos de petróleo.

El uso de la biorremediación en la restauración de sitios contaminados se debe a su compatibilidad con el medio ambiente, los bajos costos en comparación con los métodos tradicionales la hacen sustentable, además de promover la regeneración del ecosistema, sin producir residuos secundarios tóxicos. Sin embargo, para su correcto funcionamiento, la biorremediación requiere de la suplementación con nutrientes y oxigeno (bioestimulación), así como de la inoculación de microorganismos capaces de degradar compuestos (bioaumentación). Esta técnica puede emplearse como una solución ecológica y efectiva para la limpieza de áreas contaminadas con hidrocarburos, además de ser rentable y con menos efectos perjudiciales, por lo que su uso puede ser una alternativa al empleo de métodos físicos o químicos convencionales o funcionar en sinergia para mejorar la limpieza de los sitios contaminados.

Por otra parte, el avance en áreas de la ingeniería genética ha permitido el desarrollo de consorcios microbianos especializados y de sistemas de monitoreo ambiental en tiempo real, lo que abren nuevas posibilidades para optimizar la degradación de los hidrocarburos. En conjunto con tecnologías limpias, la biorremediación tiene el potencial de convertirse en una pieza clave para la recuperación ambiental y la transición hacia una gestión más responsable de los recursos naturales.

Conclusión

Debido a la creciente demanda energética, la contaminación por hidrocarburos representa un problema serio para la salud y el bienestar de los seres vivos. En este sentido, debido a su capacidad para degradar compuestos tóxicos y transformarlos a menos dañinos, la biorremediación microbiana representa una alternativa eficaz, sostenible y respetuosa con el

medio ambiente. A pesar de sus ventajas, aún enfrenta retos como la adaptación de los microorganismos a las condiciones específicas del sitio y de los tiempos prolongados durante su aplicación.

Referencias

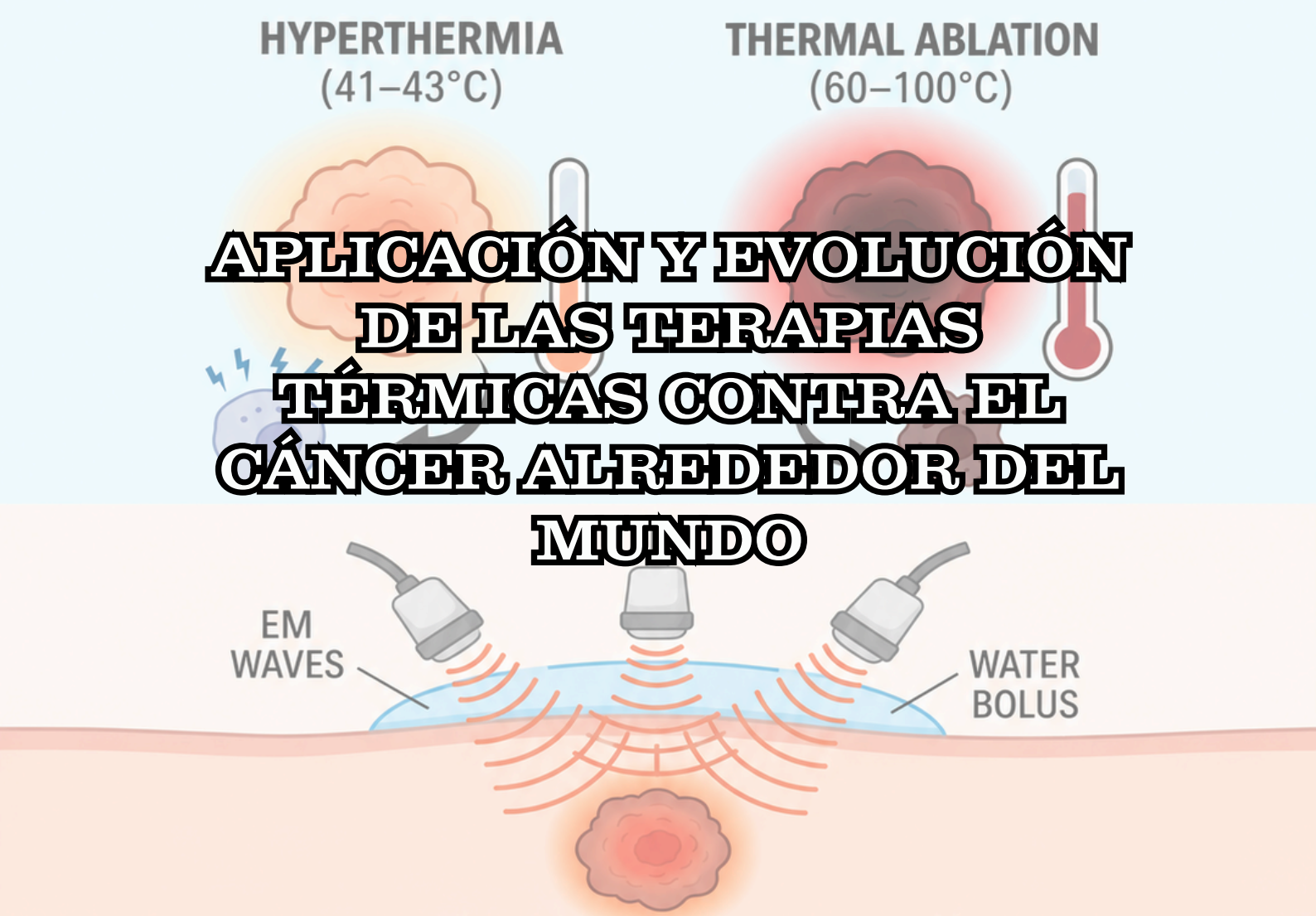
[1] Peraza-Liñan, D. L., Ayil-Gutiérrez, B. A., Urías-Salazar, A. A., López-Santillán, J. A., Estrada-Drouaillet, B., Segura-Martínez, M. T. J. y Poot-Poot, W. A., Biodegradation of crude oil by *Aspergillus tubingensis:* biosurfactant-producing strain. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 24[1], pp.1–11, 2025.

[2] Silva M., J. P., Da Silva, A. F., Delgado D., R. T. y Giachini A. J., Explorong novel fungal-bacterial consortia for enhanced petroleum hydrocarbon degradation. *Toxics*, 12[913], pp.1–26, 2024.

[3] Wu, T., Xu, J., Xie, W., Yao, Z., Yang, H., Sun, Ch. and Li, X., *Pseudomonas aeruginosa* L10: A hydrocarbon-degrading, biosurfactant-producing, and Plant-Growth-Promoting endophytic bacterium isolated from a reed (*Phragmites australis*). *Frontiers in Microbiology*, 9, pp.1–12, 2018.

[4] Chen, W., Sun, J., Min, R., Wang, L., Zhang, J., Qiao, H. y Cheng, S., Crude oil biodegradation by a biosurfactant-producing bacterial consortium in high-salinity soil. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12, pp.1–17, 2024.

[5] Obayori, O. S. y Salam, L. B., Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons: Role of plasmids. *Scientific Research and Essays*, 5[25], pp.4093–4106, 2010.



APLICACIÓN Y EVOLUCIÓN DE LAS TERAPIAS TÉRMICAS CONTRA EL CÁNCER ALREDEDOR DEL MUNDO

Dra. Citlalli Jessica Trujillo Romero
Laboratorio de Biomecánica, Instituto Nacional de Rehabilitación-LGII

Dra. Raquel Martínez Valdez
Departamento de Ingeniería Biomédica/Universidad Autónoma de Aguascalientes

Dr. Texar Javier Ramírez Guzmán
Investigador Posdoctoral por México. Laboratorio de Biomecánica, Instituto Nacional de Rehabilitación-LGII

Médico Residente José Raziel Sánchez Sánchez
Residente de traumatología y Ortopedia. Instituto Nacional de Rehabilitación - LGII

Dr. José de Jesús Agustín Flores Cuautle
SECIHTI-Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba

Fotografía obtenida de colección personal basada en IA

Abstract
The purpose of thermal therapies is to increase locally or whole-body temperature over the usual body temperature (37°C) to achieve therapeutic effects in cancer treatment by means of hyperthermia or thermal ablation. During oncologic hyperthermia, tumor temperature rises between 41-43°C; meanwhile, ablation therapy achieves temperature increments in the treatment region between 60-100°C. Some technologies use electromagnetic (EM) waves, such as radiofrequency (RF) and microwaves (MW), to induce hyperthermia by using one or more external applicators which are placed above a water bolus that is located over the patient skin in the treatment zone. On the other hand, one or more *micro*-coaxial antennas are inserted in the tumor during thermal ablation. In the last years, there has been an increase in research on thermal therapies effects by carrying out clinical essays, combined treatments, nanoparticles use, among others. China, USA and some other countries in Europe are leading the development of thermal therapies technology and its clinical applications. The goal of this work is to describe thermal therapies, such as hyperthermia and ablation, in cancer treatment; moreover, it depicts an overall panorama of the newest advances in thermal therapies around the world.

Key words: cancer, microwaves, radiofrequency, thermotherapies.

Resumen
Las terapias térmicas, para el tratamiento contra el cáncer, buscan elevar la temperatura corporal o local por encima de la temperatura del cuerpo humano (37°C) para lograr efectos terapéuticos. Este incremento de temperatura se induce mediante fuentes de calor externas y se puede inducir hipertermia o ablación térmica. Durante la hipertermia oncológica, la temperatura del tumor se eleva entre 41-43°C; mientras que, la ablación térmica logra incrementos en la zona de tratamiento entre 60-100°C. Algunas tecnologías emplean ondas electromagnéticas (EM), como lo son las radiofrecuencias (RF) y microondas (MW), para inducir hipertemia por medio de uno o más aplicadores externos que se colocan mediante una almohadilla de agua sobre la piel del paciente en la zona a tratar. Mientras que, para ablación, se emplean una o más antenas *micro*-coaxiales que se insertan en el tumor. En los últimos años se ha registrado un incremento en la investigación sobre los efectos de las terapias térmicas por medio de ensayos clínicos, tratamientos combinados, uso de nanopartículas, entre otros. Los países que predominan en el desarrollo y aplicación clínica de las terapias térmicas son China, Estados Unidos y algunos países de Europa. En este trabajo se describe el uso de la hipertermia y la ablación en el tratamiento contra el cáncer; además, se ofrece un panorama de los últimos avances de las terapias térmicas en el mundo.

Palabras clave: cáncer, microondas, radiofrecuencia, termoterapias.

Introducción

La palabra hipertermia proviene de la combinación de las palabras griegas *hypér* (exceso) y *thermo* (caliente), esto puede interpretarse como un incremento en la temperatura del cuerpo o alguna parte de él para lograr un efecto terapéutico. Algunas culturas antiguas usaron altas temperaturas para tratar diferentes enfermedades; incluso creían

que el sol tenía propiedades curativas (Aldahan, 2016). La temperatura se elevaba mediante el uso de baños de barro, aguas termales, aire caliente y vapor de cuevas volcánicas. Los primeros textos sobre el tratamiento de tumores de mama fueron realizados por un sacerdote egipcio (2655-2600 A.C.). El papiro de Edwin Smith, de aproximadamente 1700 A.C., describe el uso de "simulacros de incendios" utilizando palos y cuchillas calientes para tratar el cáncer de mama (Afify, 2023; Piemonte, 2018). Hipócrates (460-370 A.C.) solía decir: *"Aquellas enfermedades que los medicamentos no curan, el hierro cura; aquellas que el hierro no puede curar, el fuego cura; y aquellas que el fuego no puede curar, deben considerarse totalmente incurables"* (Pascual, 2023, p.1229; Piemonte, 2018, p.200), esto habla de su confianza en el uso terapéutico de la temperatura. Los médicos de la antigua Grecia y Roma creían que era posible curar todas las enfermedades, incluido el cáncer, siempre que lograran controlar la temperatura del cuerpo humano (Hong, 2010). El filósofo griego Parménides estaba tan convencido de la efectividad de la hipertermia que dijo: *"Dame el poder de producir fiebre y curaré todas las enfermedades"* (GAS, 2011, p.37).

En la historia, frecuentemente se mencionan diversos métodos para generar hipertermia, como: envolver a los pacientes en plástico, sumergirlos en cera caliente o colocarlos dentro de habitaciones con calefacción especial. Además, se tiene registro de la llamada hipertermia de perfusión; ésta consistía en extraer sangre del paciente, calentarla y, posteriormente, regresarla al cuerpo. Desafortunadamente, estas técnicas no siempre eran exitosas y conducían a la muerte del paciente (GAS, 2011). Carl D.W. Busch (1826-1881) publicó el primer artículo (1866) que mostró que las altas temperaturas podían matar, selectivamente, a las células cancerosas sin afectar el tejido sano alrededor del tumor. Posteriormente, se reportó que una mujer con un tumor maligno en el rostro se curó, del tumor, después de haber tenido fiebre provocada por una infección (Vorst, 2006). Algunos casos similares despertaron el interés por la hipertermia y sus efectos. Sin embargo, la falta de métodos controlados para inducir el calentamiento y el monitoreo de la temperatura frenó los avances en su aplicación clínica. El interés por la termoterapia volvió a surgir cuando Crile (Crile, 1962) y Ben-Hur (Ben-Hur, 1974) demostraron que la combinación hipertermia con la radioterapia mejoraba el efecto terapéutico. En los años 70, surgieron varios laboratorios que investigaban las radiaciones electromagnéticas y sus efectos biológicos. La técnica de hipertermia comenzó a validarse en cultivos celulares y en tumores in vivo, demostrando la relación entre el incremento de temperatura (~5°C) y la muerte celular (Habash, 2006); sin embargo, el control de la temperatura aún era limitado. Debido a las limitaciones y efectos secundarios de las terapias convencionales, se siguieron buscando alternativas a dichas terapias, lo cual despertó mayor interés en la termoterapia. Como resultado, se han obtenido grandes avances en el diseño y desarrollo de dispositivos para incrementar, de manera localizada, la temperatura del tumor, así como para monitorear el progreso del tratamiento. Aunque el objetivo de las terapias térmicas es lograr calentar al tumor por encima de ciertos umbrales, sin dañar tejido sano circundante, el éxito de la terapia depende, también, de diversos aspectos biológicos y tecnológicos. En

este trabajo se describen las terapias térmicas (hipertermia y ablación), y sus aplicaciones en el tratamiento contra el cáncer; además, se ofrece un panorama de los últimos avances en investigación, grupos de investigación líderes, y ensayos clínicos que emplean las terapias técnicas alrededor del mundo.

Hipertermia oncológica

La hipertermia es un tratamiento oncológico que consiste en elevar la temperatura del tumor entre 41–43°C y, se usa para aumentar los efectos de la radioterapia y la quimioterapia. Los mayores avances tecnológicos en la hipertermia oncológica se dieron a partir de 1970; época en la que se introdujo el uso de la radiofrecuencia (RF) y las microondas (MW). El uso de las ondas electromagnéticas permitió que se alcanzará una mayor distancia dentro del tejido para mejorar el calentamiento sobre el tumor; así como, tener un mayor control del calentamiento en tejidos profundos. También, se desarrollaron los primeros sistemas de control y monitoreo de la temperatura durante los tratamientos (Piemonte, 2018). A partir de esto, se realizaron los primeros ensayos clínicos controlados que demostraron la efectividad de la hipertermia; sobre todo, cuando se combina con radioterapia y quimioterapia. En la actualidad, hay otras técnicas, como el ultrasonido (US), que logran un mayor aumento de temperatura solo en el área afectada evitando daños al tejido sano cercano. Además, es posible utilizar nanopartículas que pueden ser dirigidas a los tumores y calentadas mediante campos magnéticos o infrarrojos para lograr hipertermia localizada. En cuanto a la planeación y monitoreo de la terapia en tiempo real, actualmente, se puede realizar por medio de imágenes obtenidas por resonancia magnética (IRM) y tomografía por emisión de positrones (PET). Sin embargo, estos equipos son muy costosos, por lo que este tipo de monitoreo no es común. La mayoría de las veces, únicamente, se cuenta con sensores de temperatura para monitorear, de manera puntual, el incremento de ésta en los diferentes tejidos durante el tratamiento.

Ablación térmica

La ablación térmica consiste en incrementar la temperatura del tumor entre 60–100°C en pocos segundos, lo que ocasiona muerte celular inmediata o coagulación de las células tumorales (Stauffer, 2018). Las primeras aplicaciones de ablación térmica se dieron alrededor de 1980. Normalmente, se aplicaba durante cirugías abiertas por medio de electrocauterios, que son dispositivos empleados para quemar el tejido. A partir de 1990, surge la ablación por radiofrecuencia (RFA) y, con ello, se da inicio al uso de agujas especializadas que se insertan en el cuerpo, a través de la piel, para destruir los tumores mediante la generación de calor. Actualmente, existen agujas más seguras y eficaces que tienen una mayor precisión para enfocar el calor sobre la zona del tratamiento y reducir el daño producido a tejidos sanos (Fallahi, 2018). En los años 2000, la ablación térmica por microondas (MWA) cobró mayor auge, ya que ofrece un mayor control de la zona a tratar y puede ser empleada a mayores profundidades, en comparación con la RFA. En estos días, las técnicas como ablación por láser y crioablación, ablación por medio de temperaturas bajo cero, también se encuentran bajo desarrollo (Piemonte, 2018). Al igual que en la RFA, se utilizan tecnologías de imagen avanzadas como

la tomografía computarizada (TC), la IRM y el ultrasonido para guiar y monitorear los procedimientos en tiempo real (Stauffer, 2018).

Descripción de la técnica y forma de aplicación

Hipertermia

En la práctica clínica es posible tratar tumores superficiales o profundos, esto se define como la cercanía o lejanía que tiene el tumor respecto a la piel. La Figura 1 muestra dos modos de aplicación de la hipertermia. La Figura 1a) describe la configuración básica para un tratamiento de hipertermia superficial. En este caso, se usa uno o más aplicadores de radiofrecuencia; esto depende del tamaño de la zona a tratar, así como de los incrementos de temperatura deseados. Este modo de tratamiento utiliza aplicadores externos que se colocan encima de una almohadilla con agua ubicada sobre la piel del paciente, en la zona a tratar. La almohadilla regula la temperatura de la piel y evita quemaduras (Stauffer, 2018). El registro de las temperaturas alcanzadas durante el tratamiento se realiza por medio de un conjunto de sensores; esta información se visualiza en una computadora. Si las temperaturas deseadas no son las adecuadas, la potencia en cada aplicador se puede ajustar. Durante el tratamiento, el paciente se encuentra consiente; por lo tanto, en caso de sentir dolor, los aplicadores se pueden apagar. La Figura 1b) muestra un sistema de hipertermia profunda que consta de un arreglo de aplicadores en forma de anillo que rodea la almohadilla de agua y, a su vez, al paciente. Al igual que en el caso de la hipertermia superficial, es posible monitorear las temperaturas.

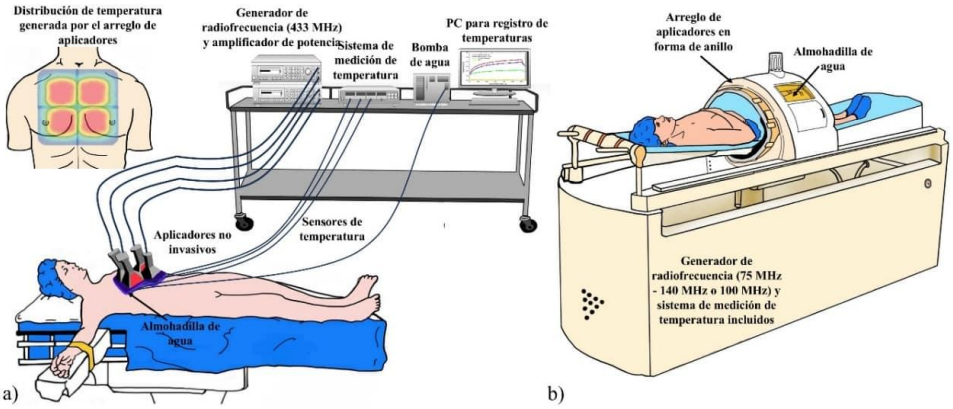


Figura 1: Aplicación de un tratamiento de hipertermia. a) hipertermia superficial utilizando un arreglo de aplicadores no invasivos, b) hipertermia regional profunda utilizando un arreglo de aplicadores en forma de anillo. (Elaboración propia).

Ablación térmica por radiofrecuencia (RFA)

La ablación térmica por RF utiliza la conducción eléctrica a través de los tejidos del cuerpo para el tratamiento de los tumores. La forma en que se destruye el tejido se basa en el paso de corriente eléctrica en los fluidos corporales; esta corriente produce calor debido al efecto Joule (Almusawi, 2023). En otras palabras, los electrones, de la corriente eléctrica, se mueven a través del tejido y este movimiento se convierte en calor. El calentamiento directo por RFA ocurre cerca del electrodo, pero se expande a las áreas circundantes por conducción térmica, creando una zona

de ablación más amplia. La corriente eléctrica alterna utilizada en la RFA llega a alcanzar frecuencias entre 450 - 500 kHz (Stauffer, 2018).

Ablación térmica por microondas (MWA)

La ablación por MWA utiliza frecuencias que van desde 900 MHz hasta 2450 MHz (Stauffer, 2018; Piemonte, 2018). La energía de microondas se dirige hacia el tejido a través de una antena que se inserta directamente sobre el tumor a tratar; la antena se encarga de transferir la energía de las microondas hacia el tejido (Figura 2). Los principios que rigen el funcionamiento de estas antenas son similares a los de las antenas para radio o televisión, con la diferencia de que estas antenas se insertan en el tejido a tratar. Una fuente de energía crea una corriente eléctrica en la antena y se genera una onda electromagnética que se propaga más allá de la antena (Prakash, 2022). El tejido absorbe esta energía y se calienta. Para incrementar el tamaño de la lesión producida en el tumor se pueden usar arreglos de antenas (Fallahi, 2018). Las microondas pueden propagarse y calentar eficazmente muchos tipos de tejido, entre ellos el hueso.

La Figura 2 muestra un sistema de MWA, cuyo principal componente son las antenas micro-coaxiales. El número de antenas utilizadas depende del tamaño del tumor a tratar. El sistema de MWA consta de un generador de microondas (2.45 GHz) y un amplificador que alimentan a las antenas. Además, se utiliza un sistema de termometría para monitorear la temperatura durante el tratamiento. La MWA es una terapia mínimamente invasiva; es decir, el paciente se somete a una pequeña cirugía para la inserción de la antena. Por lo tanto, es necesario contar con una máquina de anestesia y un monitor de signos vitales durante el tratamiento. La inserción de la antena sobre el tumor se hace con ayuda de un sistema de imágenes médicas, como puede ser el ultrasonido.

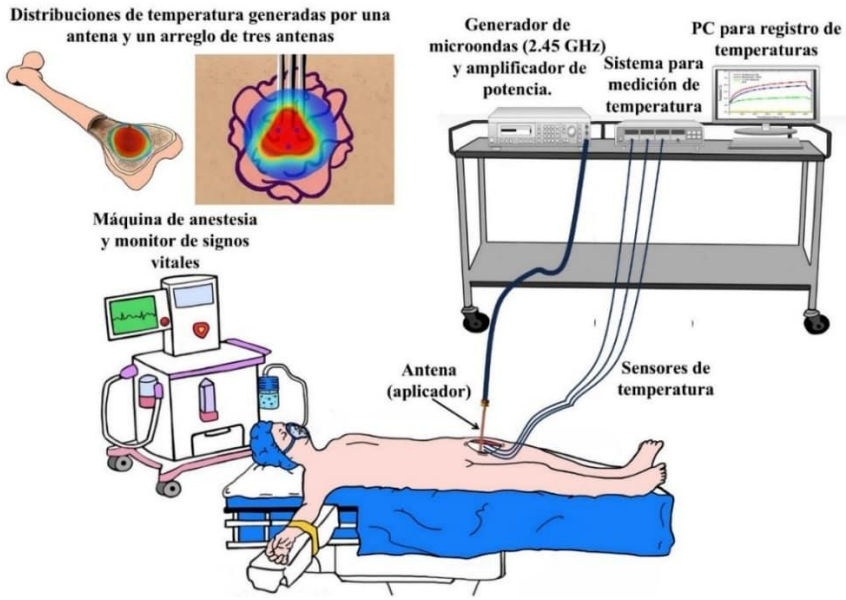


Figura 2: Aplicación de un tratamiento de ablación térmica por microondas utilizando una antena micro-coaxial (tratamiento mínimamente invasivo). (Elaboración propia).

Las terapias térmicas alrededor del mundo

La Figura 3 muestra un gráfico de los trabajos científicos relacionados con los tratamientos de hipertermia y ablación térmica en los últimos cinco años (2019-2024). Los datos de este gráfico provienen de la base de datos PubMed® (administrada por la National Library of Medicine (NLM)) utilizando los términos hipertermia, ablación térmica y cáncer. El total de publicaciones encontradas fue de 282; de los cuales, 237 corresponden a hipertermia, mientras que los 45 restantes a ablación térmica. La temática varía desde ensayos clínicos, análisis retrospectivos– hipertermia o ablación térmica-, experimentación en modelos animales, diseño tecnológico, análisis de los efectos biológicos en los tejidos, así como en las células cancerígenas, además del uso de terapias combinadas con terapias térmicas y de nanotecnología, entre otras. Es importante notar que la mayoría de los trabajos publicados corresponden al uso de la hipertermia, en comparación con la ablación térmica. Esto indica un mayor avance en el desarrollo, aplicación y análisis de los efectos de la hipertermia. Lo anterior, debido a que la hipertermia ha estado presente en el ámbito de la investigación y la clínica por más tiempo. Además, se observa que el empleo de nanotecnologías y de otras terapias se están evaluando en conjunto con la aplicación hipertermia en el tratamiento contra el cáncer.

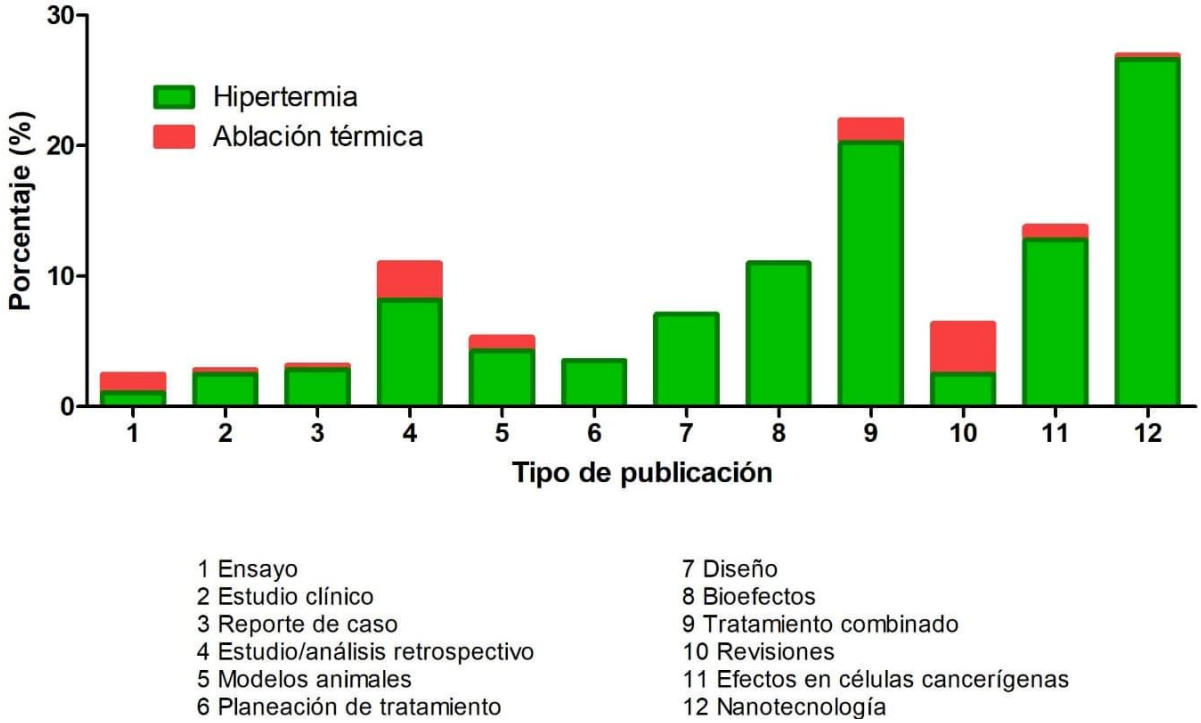


Figura 3: Porcentaje de artículos científicos, de libre acceso y en extenso, publicados entre los años 2019-2024 referentes al uso de hipertermia o ablación térmica para el tratamiento contra el cáncer. (Información extraída de la base de datos PubMed® del sitio pubmed.ncbi.nlm.nih.gov). (Elaboración propia).

La evolución de la tecnología utilizada en terapias como la hipertermia y la ablación para tratar tumores ha sido significativa y, principalmente, impulsada por avances en la ingeniería biomédica, la física médica y la biología del cáncer. Recientemente, los avances en la inteligencia artificial permiten

el uso de algoritmos para planificar y personalizar tratamientos basados en datos específicos del paciente. Además, los últimos avances de la robótica permiten la implementación de sistemas robóticos para aumentar la precisión y hacer menos invasivos los procedimientos de ablación. La evolución de estas tecnologías ofrece mejores resultados y reduce los efectos secundarios para los pacientes.

En la actualidad, existen diferentes técnicas de aplicación para el tratamiento de diversos tumores utilizando la hipertermia oncológica o la ablación térmica. La Figura 4 muestra los estudios clínicos alrededor del mundo para los diferentes tipos de cáncer tratados con hipertermia, ablación por RFA y ablación por MWA. Para hacer este gráfico, se utilizó la base de datos del sitio ClinicalTrials.gov, que es administrado por la NLM y es considerado como la biblioteca más grande del mundo de literatura biomédica. El patrocinador o investigador del estudio clínico es responsable de la seguridad, la ciencia y la precisión de cualquier estudio/resultado que se incluya. La Figura 4 muestra que la hipertermia (Figura 4a) y la MWA (Figura 4c) son las técnicas con el mayor número de registros. En hipertermia se encontraron 39 estudios, en los cuales predomina el tratamiento de cáncer en hígado, colon y pulmón. China y Estados Unidos son los principales países en los que se realizan estos estudios. Muy pocos estudios clínicos sobre RFA se encuentran registrados (4), siendo el cáncer de hígado el más tratado, y Estados Unidos el país con más estudios realizados. Finalmente, existen 51 estudios registrados de MWA. Los diferentes tipos de cáncer en hígado, colon, mama, pulmón y tiroides son los más tratados; mientras que China y Estados Unidos son los principales países en los que se efectúan.

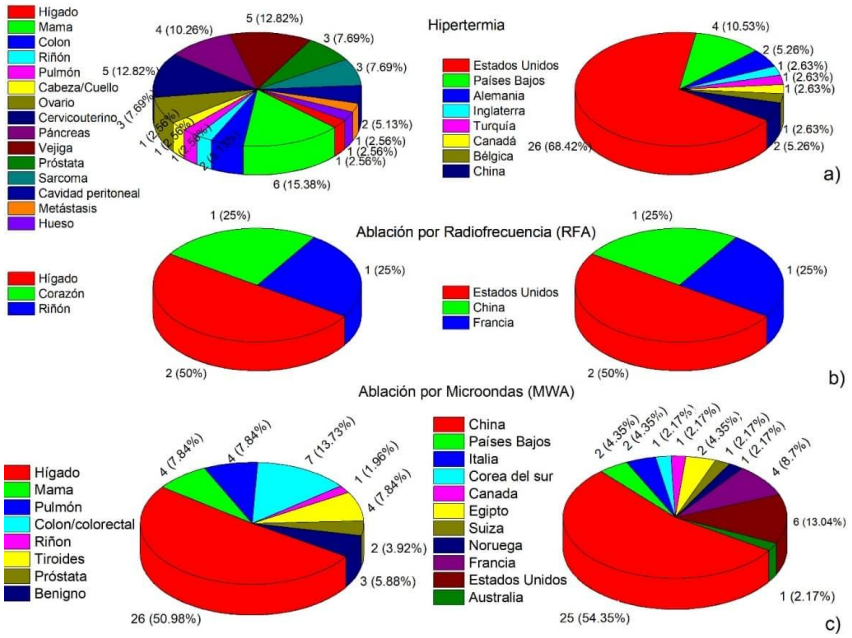


Figura 4: Número de estudios clínicos registrados en ClinicalTrials.gov por tipo de cáncer y países en los que se están realizando, a) hipertermia oncológica, b) ablación térmica por radiofrecuencia (RFA), c) ablación térmica por microondas (MWA). (Elaboración propia).

A fin de conocer la relación entre instituciones, países y tipos de investigación se utilizó la información de la base de datos Web of Science utilizando los términos de ablación, radiofrecuencia, microondas e hipertermia. La Figura 5 muestra un gráfico que muestra la forma en la relación existente entre este tipo de estudios. En total, se encontraron 480 estudios con aplicación clínica realizados en los últimos 10 años. Además, en el campo de palabras clave se muestran las palabras más relevantes dentro de los estudios señalados. Es posible observar que Estados Unidos y China son los líderes en este tipo de investigaciones. Adicionalmente, se puede apreciar que el uso de nanopartículas y liberación de fármacos son algunas de las líneas de investigación en auge.

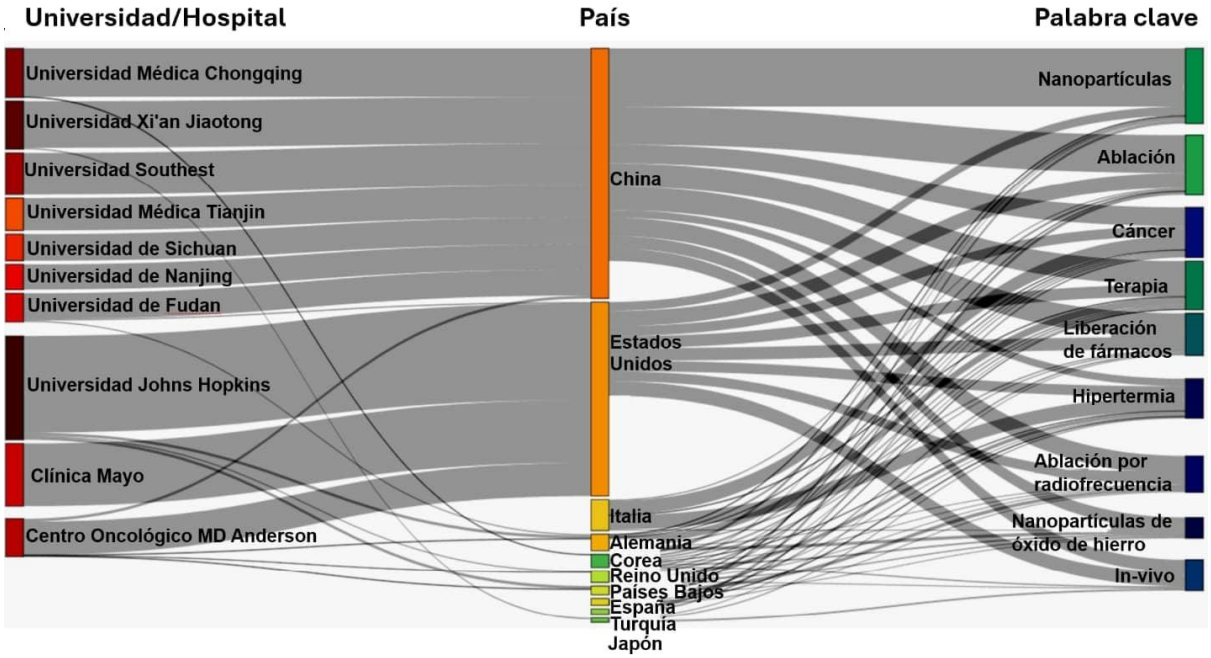


Figura 5: Gráfico de tres campos sobre el uso de las terapias térmicas. (Elaboración propia).

Actualmente, hay diversos estudios clínicos en proceso de evaluación enfocados en distintos tejidos, tanto para hipertermia oncológica, como para ablación térmica, que son dirigidos por diferentes países. Sin embargo, a pesar de los más recientes avances, existen diversos retos que afrontar en el uso de estas terapias, específicamente enfocados en la validación de las técnicas al tratar de implementarlas en el tratamiento de los diferentes tipos de tumores. Por lo tanto, es necesario diseñar aplicadores de uso específico para cada tipo de tejido a tratar para asegurar la focalización del calor sobre la región de interés (tumor) evitando daños en el tejido sano circundante. Por otro lado, la implementación y validación de sistemas de planeación de tratamiento personalizado constituyen otro reto. Estos consisten en la generación de modelos computacionales que emplean imágenes médicas del paciente para hacer una reconstrucción anatómica. El objetivo es predecir el posible resultado del tratamiento, de acuerdo con las características específicas del paciente y, de esta forma, determinar los parámetros del tratamiento que aseguren el aumento de temperatura en la zona de interés.

Conclusión

Las terapias térmicas son una alternativa no invasiva o mínimamente invasiva para el tratamiento contra el cáncer. Las Figuras 4 y 5 muestran que China, Estados Unidos y unos pocos países de Europa lideran los esfuerzos por lograr implementar las terapias térmicas como un tratamiento oncológico. Desafortunadamente, en Latinoamérica existen muy pocos equipos de trabajo enfocados en la aplicación de estos tratamientos. Específicamente en México, investigadores del Instituto Nacional de Rehabilitación-Luis Guillermo Ibarra Ibarra (INR-LGII) y del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN) están desarrollando la tecnología necesaria para implementar la ablación térmica por microondas (MWA) como tratamiento para tumores óseos. Dichos esfuerzos se llevan a cabo en conjunto con investigadores de otras instituciones como la Universidad Autónoma de Aguascalientes y el Instituto Tecnológico de Orizaba, entre otras. Aunque, actualmente, son pocos los investigadores enfocados en esta línea de investigación, se espera que, debido a los altos niveles de prevalencia del cáncer, se inicien varios proyectos gubernamentales centrados en reforzar la infraestructura de atención al cáncer, como construir nuevos centros contra el cáncer enfocados en la investigación tecnológica. Sumado a esto, es necesario contar con un marco regulatorio adecuado relacionado con la ablación tumoral en los países en desarrollo.

Agradecimientos
Martínez-Valdez, R. y Ramírez Guzmán, T. J., agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), antes Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), por las becas otorgadas dentro del programa de Estancias Posdoctorales por México.

Financiamiento
Este trabajo fue financiado parcialmente por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), fondo Ciencia de Frontera 2023 [Número de financiamiento: CF-2023-G-1010].

Declaración de contribución de autores y colaboradores

Trujillo-Romero, C. J.: Conceptualización, Metodología, Redacción - Revisión y Edición.

Martínez-Valdez, R: Conceptualización, Redacción - Preparación del borrador original.

Ramírez Guzmán, T. J.: Visualización, Investigación.

Sánchez Sánchez, J. R.: Visualización, Investigación.

Flores Cuautle, J. J. A.: Redacción - Revisión y Edición.

Referencias

[1] Afify, S. M., y Seno, M., *On the Origin of Cancer*. Methods in Cancer Stem Cell Biology, Springer Nature Singapore, pp. 1-21, 2023. DOI: 10.1007/978-981-99-1331-2_1.

[2] Aldahan, A. S., Shah, V. V., Mlacker, S., y Nouri, K., Sun Exposure in History. *JAMA dermatology*, 152[8], pp.896-896, 2016. DOI:10.1001/jamadermatol.2015.5660.

[3] Almusawi, Y. K., Al-Sammarraie, M. R. H., Shikara, M. D.,

The Effect of An Electric Current on Human Body (A Review), *Al-Esraa University College Journal for Medical Sciences*, 4[5], pp.15-42, 2023. DOI:10.70080/2790-7937.1016.

[4] Ben-Hur, E., Elkind, M. M., y Bronk, B. V., Thermally enhanced radioresponse of cultured Chinese hamster cells: inhibition of repair of sublethal damage and enhancement of lethal damage, *Radiat. Res.*, 58[1], pp.38-51, 1974.

[5] Crile, G., Selective Destruction of Cancers After Exposure to Heat, *Ann. Surg.,* 156[3], pp.404-407, 1962. DOI:10.1097/00000658-196209000-00007.

[6] Fallahi, H., y Prakash, P., Antenna Designs for Microwave Tissue Ablation, *Crit. Rev. Biomed. Eng.,* 46[6], pp.495-521, 2018. DOI:10.1615/CritRevBiomedEng.2018028554.

[7] GAS, P., Essential Facts on the History of Hyperthermia and their Connections with Electromedicine, *Prz. Elektrotech.,* 12, pp.37-40, 2011.

[8] Habash, R. W. Y., Bansal, R., Krewski, D. y Alhafid, H. T., Thermal Therapy, Part 1: An Introduction to Thermal Therapy, *Crit. Rev. Biomed. Eng.,* 34[6], pp.459-489, 2006. DOI:10.1615/CritRevBiomedEng.v34.i6.20

[9] Hong, W. K., Bast Jr., R. C., Hait, W. N., Kufe, D. W., Pollock, R. E., Weichselbaum, R. R., Holland, J. F., y Frei, E., *Holland-Frei Cancer Medicine*, Eight Edition, People's Medical Publishing House-USA, pp. 2021, 2010.

[10] Piemonte, V., Basile, A., Ito, T., y Marrelli, L., *Biomedical Engineering Challenges: A Chemical Engineering Insight,* Wiley, Hoboken, New Jersey, pp.256, 2018.

[11] Pascual, J. M., Prieto, R., Rosdolsky, M., & Hofecker, V., Anton de Haen (1704–1776) and his extraordinary"portentosum infundibulumçase: the futile skull cauterization of a blind patient with a craniopharyngioma. *J Neurosurg*, 139[5], pp.1225–1234. DOI:10.3171/2023.3.JNS2381

[12] Prakash, P., *Microwave ablation*, Principles and Technologies for Electromagnetic Energy Based Therapies, Elsevier, pp.139-167, 2022. DOI:10.1016/B978-0-12-820594-5.00009-5.

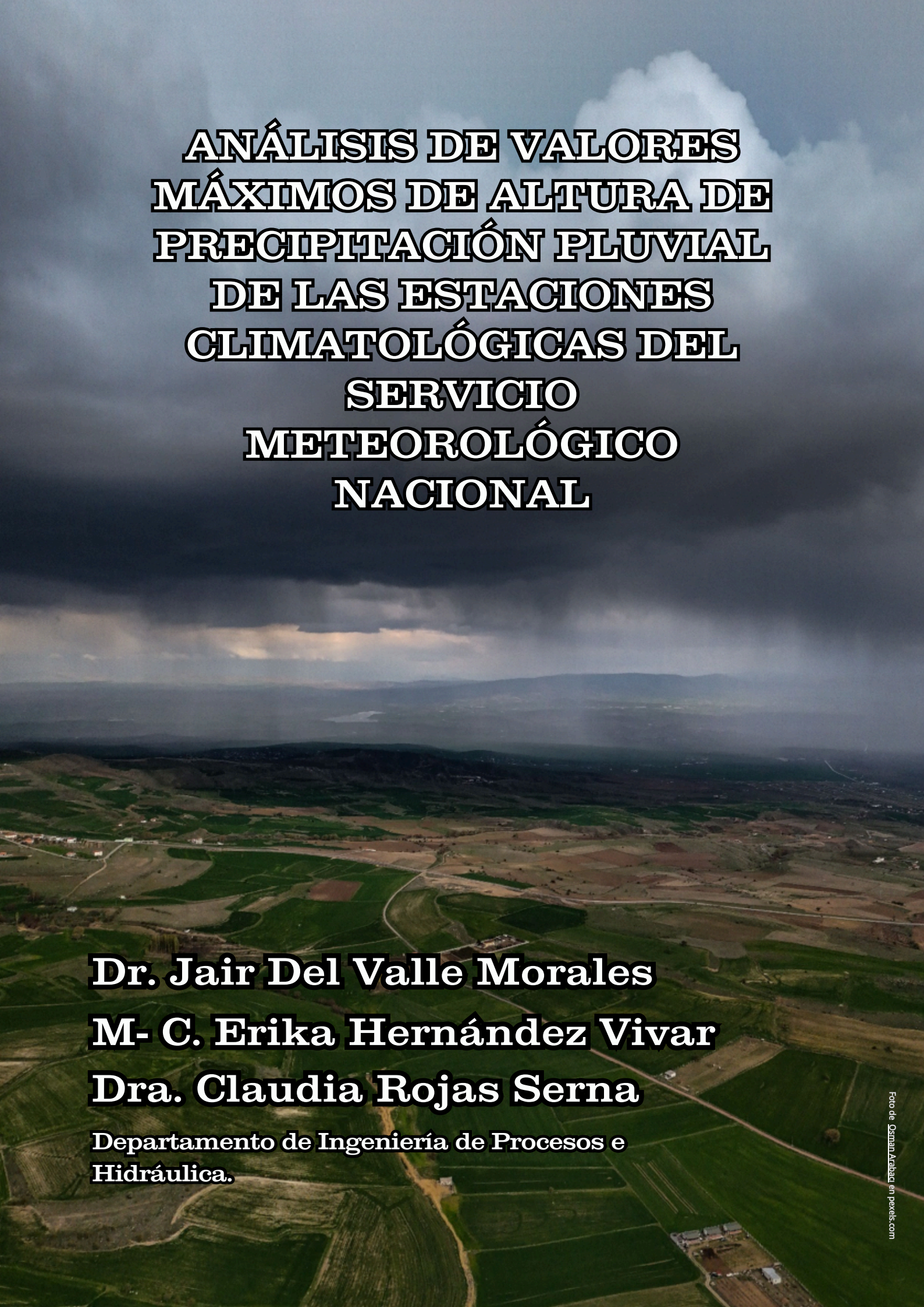
[13] Stauffer, P. R., Rodrigues, D. B., Haemmerich, D., y Chou, C. K., *Thermal therapy applications of electromagnetic energy*, Biological and Medical Aspects of Electromagnetic Fields, Fourth Edition, CRC Press, pp.305-343, 2018.

[14] Vorst, A. V., Rosen, A., y Kotsuka, Y., RF/ Microwave Interaction with Biological Tissues, Wiley-IEEE Press, Hoboken, New Jersey, pp.300, 2006.

Lecturas recomendadas

Trujillo-Romero, C. J., Ramírez G., T. J., Sánchez S., J. R., Flores C. J. J. A., Martínez-Valdez, R., ¿Qué son las terapias térmicas y cuáles son sus efectos sobre las células cancerígenas?, *Ciencia Vital*, 3[1], pp.1-8, 2025. DOI: https://doi.org/10.20983/cienciavital.2025.01.sal.01

ANÁLISIS DE VALORES MÁXIMOS DE ALTURA DE PRECIPITACIÓN PLUVIAL DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL



Dr. Jair Del Valle Morales
M- C. Erika Hernández Vivar
Dra. Claudia Rojas Serna

Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica.

Foto de Osman Arabaci en pexels.com

Abstract
This paper presents a methodology and analysis of 24-hour cumulative rainfall depth, recorded at more than 5000 weather stations (EC), which are managed and operated by the National Meteorological Service of Mexico (SMN). The analysis focuses on the annual maximum values of this climatological variable. The results of this analysis are graphs that allows for a quick visualization of the spatial and temporal behaviour of the precipitation depth. The historical maximum rainfall depths are displayed on a nationwide map. Additionally, the data has been structured into detailed tables that include the maximum rainfall values and their ranges for each federal state.

Key words: rainfall depth; EC; SMN; annual maximum value

Resumen
El presente trabajo muestra un metodología y análisis de la información de lámina de lluvia o altura de precipitación acumulada en 24 horas, registrada en sus más de 5000 estaciones climatológicas, EC, que administra y opera el Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN). El análisis se enfoca en el manejo de los valores máximos anuales de esta variable climatológica. Los productos de este análisis son gráficas que permiten la visualización rápida del comportamiento espacial y temporal de la altura de precipitación. Se concentra la información de los valores más altos históricos de lámina de lluvia a través de un mapa de todo el país. Se obtuvieron tablas organizadas de la información, así como rangos de valores de la lámina de lluvia máxima ocurrida por entidad federativa.

Palabras clave: altura de precipitación; EC; SMN; valor máximo anual.

Introducción

Cuando ocurre el fenómeno de precipitación, sea esta una lluvia ligera o una tormenta severa, lo que sucede en términos de mediciones es que este fenómeno físico pasa a formar parte de un registro, es decir, la precipitación se registra en una base de datos de mediciones de variables hidrometeorológicas.

La unidad de altura de precipitación es la profundidad lineal, normalmente en milímetros (volumen/área) (OMM, 2023). Las mediciones diarias de precipitación deben efectuarse a horas fijas comunes para toda la red de interés; en México se mide generalmente a las 8 de la mañana y los valores registrados representan el acumulado diario de la lluvia, es decir, el acumulado diario a cada 24 horas.

En México, el organismo encargado de gestionar esta base de datos es el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) dependiente de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el cual posee una red de estaciones climatológicas (EC) distribuidas a lo largo del territorio mexicano. Éstas además de registrar el valor de precipitación, reportan valores de temperatura y evaporación en un intervalo de 24 horas. También, el SMN cuenta con una red de estaciones meteorológicas automatizadas (EMAs) y una red de estaciones sinópticas meteorológicas automatizadas (ESMAs), las cuales reportan valores cada 10 minutos de las variables meteorológicas que miden. La información de hp de estos últimos tipos de estaciones de registro de variables meteorológicas (EMA y ESMA) queda fuera del análisis del presente artículo.

En este trabajo, se presenta un análisis de la información de de lluvia acumulada en 24 horas disponible en la página

oficial del sitio web del SMN para modelar el comportamiento de las lluvias máximas anuales de manera temporal y espacial.

OBJETIVO

El objetivo principal del presente trabajo es mostrar una metodología fácil de implementar para obtener series de tiempo de valores máximos anuales de precipitacióny conocer el comportamiento de este parámetro tanto en el espacio como en el tiempo. Finalmente se calculan, organizan y sintetiza la información de los datos máximos de lámina de lluvia de las más de 5000 EC con las que cuenta el SMN, sin importar si las estaciones se encuentran midiendo (operativas) o no (suspendidas).

METODOLOGÍA

La metodología aplicada en el presente artículo se describe con detalle en los siguientes párrafos.

Primer paso: revisión de la información de los valores de altura de precipitación (valores máximos acumulados en 24 horas). Esta información se encuentra disponible en la página oficial del SMN (2025): https://smn.conagua.gob.mx/es/ en la sección “Climatología” (último acceso: julio 2025).

Segundo paso: revisión de la estructura de cómo se encuentra almacenada la información, además del tipo de archivo a manipular (es decir, el formato del archivo). En este caso, los archivos son archivos simples, escritos en código ASCII o formato txt, con fácil acceso a ella con cualquier bloc de notas y también con cualquier lenguaje de programación (Python, R, Matlab, C++, Fortran, entre otros). Para el presente análisis, se utilizó la información estadística mensual del SMN. En este sentido, estos archivos txt en particular poseen la siguiente estructura general.

· Un encabezado, donde se indican el nombre de la dependencia federal a la que pertenece la información (Comisión Nacional del Agua), coordinación dentro de la dependencia y tipo de base de datos; tipo de estadístico; última modificación hecha al archivo, así como información general de la estación climatológica (ID, nombre, coordenadas geográficas en formato decimal, entre otros aspectos.)

· Lluvia máxima acumulada en 24 horas.

· Lluvia total mensual.

· Evaporación mensual.

· Temperatura máxima promedio.

· Temperatura máxima extrema.

· Temperatura mínima promedio.

· Temperatura mínima extrema.

· Temperatura media mensual.

Es recomendable siempre revisar con detenimiento la información de las variables arriba descritas, porque es posible que alguna estación en específico no cuente con los datos medidos de alguno de los parámetros señalados.

Tercer paso: selección únicamente de la información de la lluvia acumulada en 24 horas. En este paso, se realiza el cálculo de los valores máximos anuales. Es posible encontrar valores iguales a cero y también se puede encontrar huecos o ausencia de valores en los

meses de un año en particular. Todo esto se toma en cuenta para determinar los valores máximos anuales. Al final de este paso, se obtienen las series de tiempo de valores máximos anuales de lluvia.

Cuarto paso: automatización de los procesos para la obtención de tablas y figuras mediante un lenguaje de programación. En este caso se utilizó Python, particularmente las siguientes librerías fueron cruciales para procesar la información de las más de 5000 EC del SMN: Pandas (2025), Matplotlib (2025) y Numpy (Harris, C. R., *et al.* (2020)). Por otra parte, se elaboró un mapa del país con los valores máximos de altura de precipitación. En cada entidad federativa se muestra el valor máximo histórico ocurrido. Esto se representa mediante un punto circular, el cual su ubicación representa la posición exacta de la EC donde ese máximo valor de altura de precipitación histórico de la entidad. Para obtener ese máximo valor estatal, se analizaron los máximos históricos de todas las EC que se encuentran en cada entidad. Las tablas que se generaron contienen la información de la altura de precipitación acumulada en 24 horas mensual y el valor de lámina de lluvia máxima anual. Las figuras realizadas son de dos tipos: a) serie de tiempo, y b) serie de datos ordenados de forma ascendente. Los detalles de las figuras y tablas se presentan en la siguiente sección de resultados.

En general, los cuatro pasos descritos anteriormente conforman la metodología diseñada para manipular, organizar y presentar la información de altura de precipitación pluvial o lámina de lluvia que ofrece el SMN a través de sus EC. Cabe agregar que se realizó este análisis de valores máximos de lámina de lluvia para las 5501 EC de la red del SMN

RESULTADOS

Con base en la metodología presentada en la sección anterior, se han elaborado tablas y gráficas de los valores máximos anuales de precipitación de las 5501 EC.

En primer lugar, se obtuvieron series de tiempo de los valores máximos de precipitación. Para su elaboración, se agregaron los años faltantes con el fin de mostrar los huecos que existen en los registros. En este sentido, en la Figura 1 se presenta un ejemplo de este tipo de gráfico. En él, la línea y los puntos de color azul representan la serie de valores máximos anuales de precipitación de lluvia; con un punto de color rojo, se indica el máximo de la serie de datos; en la parte superior de la gráfica se han agregado valores de tendencia central de la serie de datos; máximo, promedio, mediana y moda; finalmente, en el título se indica el ID de la estación a la que pertenece la información.

En segundo lugar, se elaboró otro tipo de gráfica para cada EC, donde la serie de datos de valores máximos anuales de lámina de lluvia se ordenaron de menor a mayor. El objetivo de este tipo de gráfico es observar el comportamiento del conjunto de valores máximos, particularmente aquellos datos que se despegan del resto de valores, formando un subconjunto de datos que se pueden considerar, bajo esta ordenación de la información, un conjunto de valores extremales o extremos; la Figura 2 muestra este tipo de gráfica. En ella, en puntos y línea de color azul se presentan los datos ordenados de menor a mayor; con un punto de color rojo se indica el máximo valor; en el eje vertical se presentan los valores de hp, en el eje horizontal se muestra el número

de datos correspondiente a la EC en cuestión, además de indicar en este mismo eje el ID de dicha EC de análisis. Cabe aclarar que el máximo valor que se presenta en la gráfica con un punto de color rojo es el mismo valor que se muestra con el mismo punto circular de color rojo de la Figura 1.

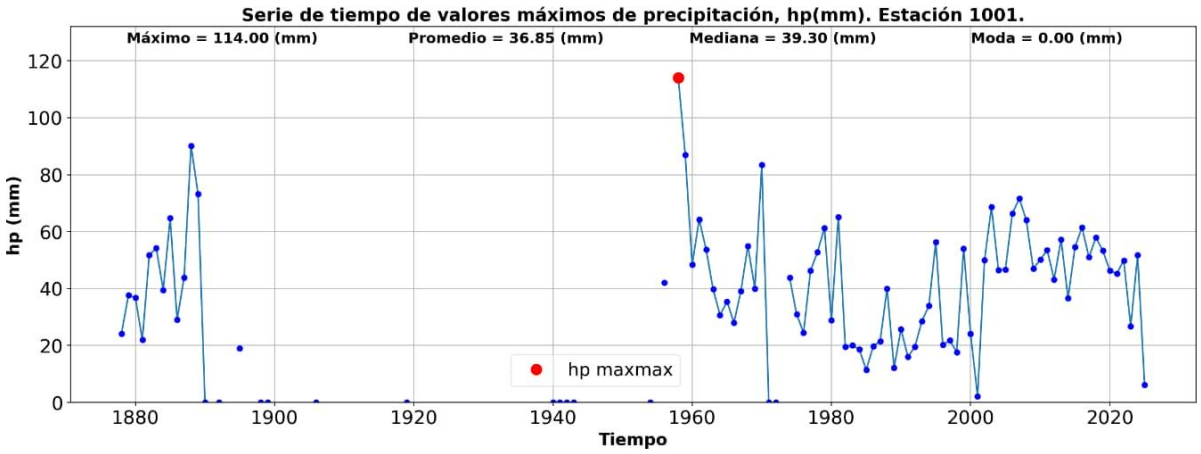


Figura 1: Serie de tiempo de valores máximos anuales de precipitación de la estación climatológica 1001.

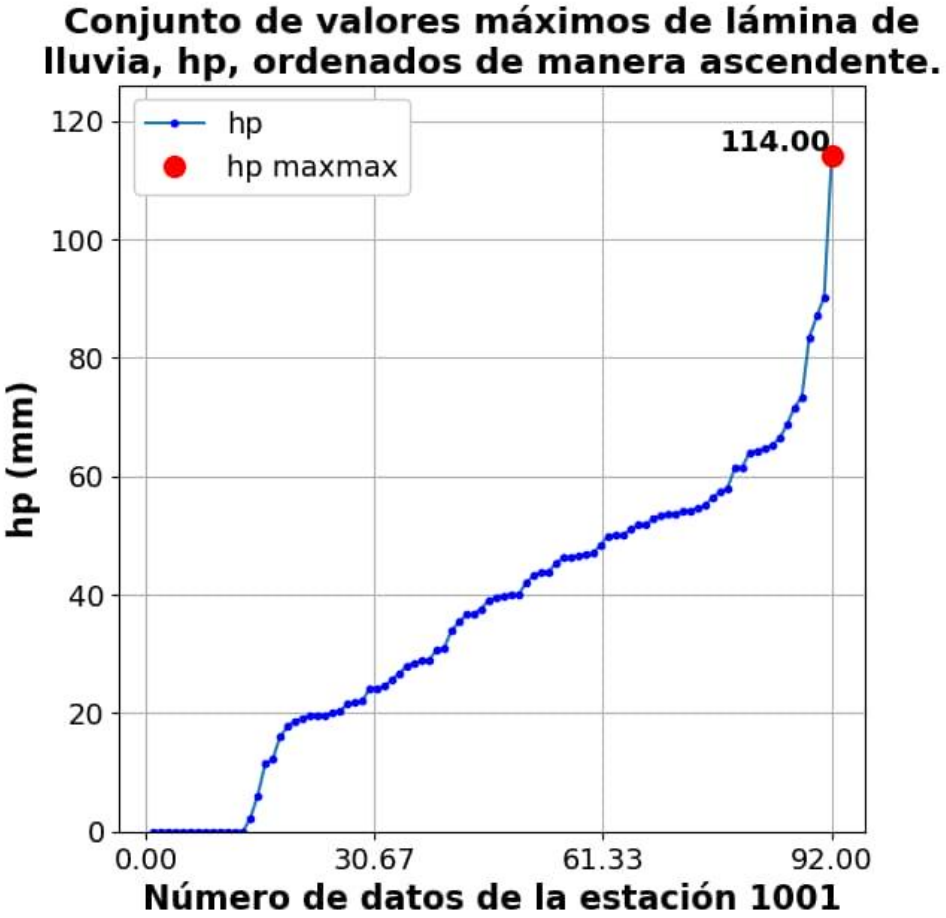


Figura 2: Conjunto de datos de valores máximos anuales de lluvia ordenados de menor a mayor, correspondientes a la estación climatológica 1001.

Por otra parte, se generaron para las EC las tablas de valores máximos anuales, esto para complementar el análisis. Como ejemplo y para fines prácticos, no se muestran dichos valores, ya que se presenta de manera visual en la Figura 1, y que por simple inspección en dicha figura, se observa que el número total de datos son 92 para esta EC en particular, es decir, son 92 años de valores máximos anuales. Con esto, el análisis temporal de la información queda terminada, es decir, para cada EC se realizaron sus dos figuras y su tabla de valores, con lo cual se observa para un punto espacial, la evolución temporal de los valores máximos anuales de precipitación. Es importante señalar que en este artículo únicamente se está presentando la información de una sola EC, en este caso la EC 1001 que pertenece al Estado de Aguascalientes, pero como se ha señalado antes, esto se realizó para el total de las EC de toda la red que gestiona el SMN. Entonces, las dos figuras (Figura 1 y Figura 2), más su tabla correspondiente (formato .xlxs) ya depurada, ordenada y con su columna adicional que contiene los valores máximos anuales se encuentran hechas y respaldas por el grupo de Ingeniería Hidrológica del departamento de Ingeniería de Procesos y Hidráulica (IPH) de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería (CBI) de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa (UAM-I), la cual puede ser consultada previa solicitud a dicho grupo de trabajo. En la Tabla 1 se muestra el número de EC por Estado de la República Mexicana, tanto operativas como suspendidas.

Para observar cómo se comporta la información espacialmente, se obtuvo el valor más alto precipitación por cada EC representados con su respectiva grafica con el punto de color rojo que se observan en la Figura 1 y en la Figura 2; con estos datos y para cada entidad federativa, se construyó una tabla y su grafica con los valores más altos de lluvia de todas las EC contenidas en cada entidad respectivamente.

En la Figura 3 se muestra el conjunto de datos más altos de altura de precipitación de cada EC del estado de Aguascalientes. En dicha figura, en puntos y con una línea de color azul se muestran los valores máximos históricos de precipitación de cada EC contenida; con un punto de color rojo se indica el valor más alto registrado, así como el ID de la EC a la que corresponde dicho valor; en un punto de color negro el valor máximo más bajo ocurrido junto con la etiqueta del ID de la EC a la que corresponde dicho valor.

En este sentido, es posible construir una serie de rangos de valores máximos para cada estado. Estos rangos se presentan en la Tabla 2. Finalmente, elaboró un mapa que representa a los valores más altos de lluvia ocurridos en cada entidad federativa (ver mapa de la Figura 4). Los puntos que se muestran en dicho mapa señalan la ubicación de la EC donde se ha presentado el máximo valor de la altura de precipitación.

Estado (identificador corto dado por el SMN)	**Número de EC**	**Estado (identificador corto dado por el SMN)**	**Número de EC**
Aguascalientes (ags)	73	Morelos (mor)	76
Baja California (bc)	139	Nayarit (nay)	80
Baja California Sur (bcs)	165	Nuevo León (nl)	172
Campeche (camp)	82	Oaxaca (oax)	356
Chihuahua (chih)	279	Puebla (pue)	215
Chiapas (chis)	302	Querétaro (qro)	63
Coahuila (coah)	119	Quintana Roo (qroo)	61
Colima (col)	57	Sinaloa (sin)	168
Ciudad de México (df)	61	San Luis Potosí (slp)	189
Durango (dgo)	167	Sonora (son)	289
Guerrero (gro)	238	Tabasco (tab)	84
Guanajuato (gto)	162	Tamaulipas (tamps)	199
Hidalgo (hgo)	151	Tlaxcala (tlax)	56
Jalisco (jal)	275	Veracruz (ver)	376
Estado de México (mex)	351	Yucatán (yuc)	97
Michoacán (mich)	238	Zacatecas (zac)	161
Subtotal de EC	**2859**	**Subtotal de EC**	**2642**
Total de EC	**5501**		

Tabla 1: Número de EC tanto operativas como suspendidas por estado de la República Mexicana.



Figura 3: Valores más altos de lámina de lluvia ordenados de menor a mayor de todas las EC del estado de Aguascalientes.

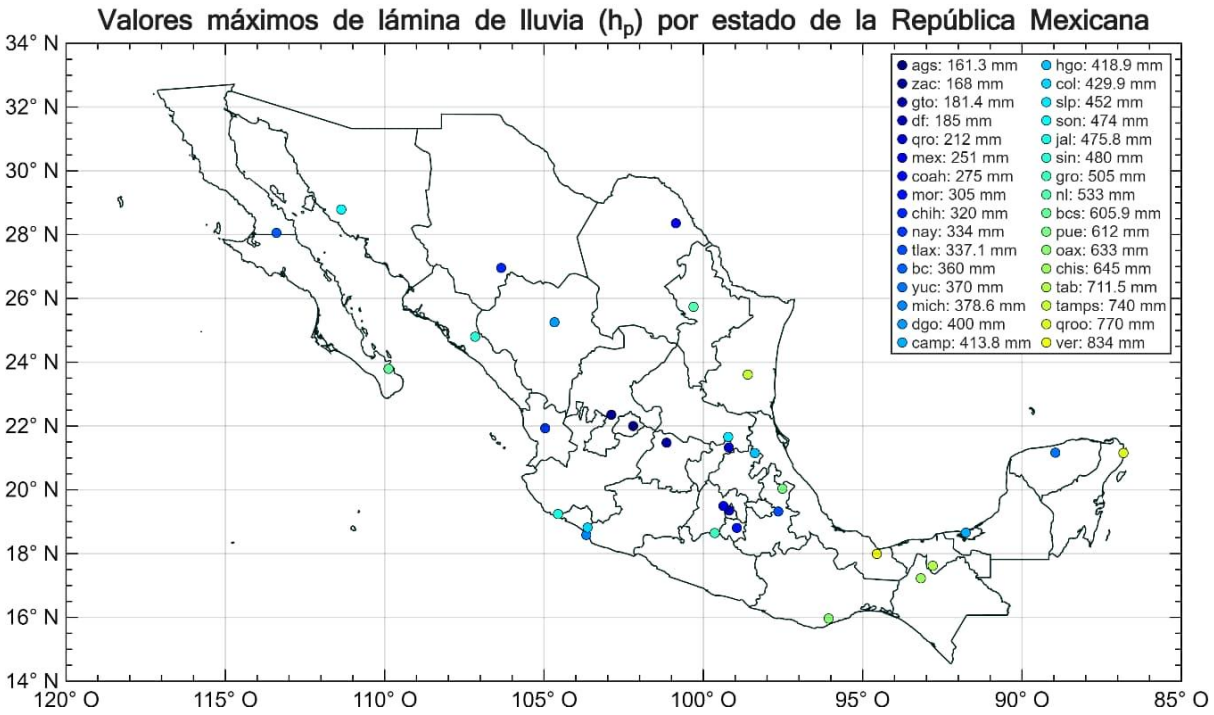


Figura 4: Valores máximos de lámina de lluvia registrados por cada entidad federativa.

Estado	Rango del valor máximo de hp (mm)	Estado	Rango del valor máximo de hp (mm)
Aguascalientes	52.80 - 161.30	Morelos	64.00 - 305.00
Baja California	7.00 - 360.00	Nayarit	**0.00** - 334.00
Baja California Sur	17.20 - 605.90	Nuevo León	40.00 - 533.00
Campeche	78.20 - 413.80	Oaxaca	46.00 - 633.00
Chihuahua	10.00 - 320.00	Puebla	37.00 - 612.00
Chiapas	50.00 - 645.00	Querétaro	29.00 - 212.00
Coahuila	23.00 - 275.00	Quintana Roo	110.00 - 770.00
Colima	102.00 - 424.90	Sinaloa	14.00 - 480.00
Ciudad de México	12.90 - 185.00	San Luis Potosí	41.40 - 452.00
Durango	29.75 - 400.00	Sonora	28.80 - 474.00
Guerrero	75.00 - 505.00	Tabasco	120.00 - 711.50
Guanajuato	50.70 - 181.40	Tamaulipas	70.00 - 740.00
Hidalgo	35.00 - 418.90	Tlaxcala	42.00 - 337.10
Jalisco	**0.00** - 475.80	Veracruz	48.20 - 834.00
Estado de México	11.00 - 251.00	Yucatán	61.30 - 370.00
Michoacán	52.00 - 378.60	Zacatecas	50.00 - 168.00

Tabla 2: Rangos de valores máximos para la precipitación pluvial de todas las EC por Estado de la República Mexicana.

CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis de valores máximos de lluvia o precipitación pluvial. Estos valores máximos provienen de los registros de hp acumulados en 24 horas, es decir, datos diarios, que registran los miles de EC de la red que administra el SMN. Caber señalar que existen EC que se encuentran operativas y otras que no. Sin embargo, no se descartó ninguna, se utilizó el total de la información de las 5501 EC del SMN. Se revisó y analizó el comportamiento de la información de valores máximos tanto temporal como espacialmente, dando como resultados miles de gráficas como las mostradas

en la Figura 1 y Figura 2 para el caso temporal. Para el caso espacial, se realizaron gráficas como la de la Figura 3, que dieron lugar a 32 gráficas, es decir, una gráfica por entidad federativa. Finalmente, se englobó esta información espacial en un mapa (Figura 4), donde se muestra el máximo histórico ocurrido en alguna de las EC, indicando a su vez la posición exacta de la EC. En dicho mapa, la información se encuentra organizada de tal manera que sea muy fácil su lectura o interpretación; se ordenaron los valores más altos de lámina de lluvia de menor a mayor, representados mediante puntos los cuales siguen un gradiente de colores, donde los colores obscuros son los valores más bajos y los colores claro representan los valores más altos de lámina de lluvia.

Por otra parte, en la Tabla 2 se presentan los rangos de valores de precipitación pluvial máxima. De ella se destacan que existen dos EC que registran valores máximos de cero. Estas estaciones son: la EC 18057 que se encuentra en el estado de Nayarit, y la EC 14342 que se encuentra en el estado de Jalisco. Al revisar dichas EC, se observó que en todos los años que registraron información, donde hubo registro, todos los valores fueron reportados iguales a cero, de ahí que se tenga ese "máximo histórico" más bajo dentro del rango de valores señalado en dicha tabla para cada una de las dos entidades federativas antes mencionadas.

Todos estos hallazgos resultan interesantes, además de que muestran una lectura muy rápida de la información de lluvia máxima acumulada en 24 horas se presenta de manera optimizada, esto con fines de consulta o comparación con otros análisis que se estén realizando donde se vea involucrada el uso y manejo de información de esta variable climatológica.

Referencias

[1] **Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J. *et al*. (2020).** *Array programming with NumPy.* Nature 585, 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.

[2] **Matplotlib (2025).** *The Matplotlib Development Team. Matplotlib: Visualization with Python (v3.10.3). Zenodo.* https://doi.org/10.5281/zenodo.15375714

[3] **OMM (2023).** *Organización Meteorológica Mundial, Guía de instrumentos y métodos de observación, Vol 1 – Mediciones de variables meteorológicas,* OMM N°8.

[4] **Pandas (2025).** *The pandas development team; pandas-dev/pandas: Pandas (v2.3.1). Zenodo.* https://doi.org/10.5281/zenodo.15831829

[5] **SMN (2025).** *Servicio Meteorológico Nacional:* https://smn.conagua.gob.mx/es/. Sección "Climatología" (último acceso: julio 2025).

INFORMACIÓN Y TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS: PROGRAMA EMERGENTE DEL POSGRADO DIVISIONAL DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

Dr. Gilberto Espinosa Paredes
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Miguel A. Bastarrachea Magnani
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Rodolfo O. Esquivel Olea
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. José L. Hernández Pozos
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dra. Norma P. Castellanos Abrego
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Humberto Laguna Galindo
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Isaac Pérez Castillo
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Robin Preenja Sagar
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Alejandro Kunold
Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco

Dr. Norberto Aquino Aquino
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Jorge R. Bolaños Servín
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Adrián M. Escobar Ruiz
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Ángel A. García Chung
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Roberto Quezada Batalla
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Josué I. Ríos Cangas
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Enrique Rodríguez de la Colina
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Dr. Leonardo Palacios Luengas
División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Obtenida de pexels.com (pexels-evija-ciematniece-1914823-35496838)

I. Introducción

Con el nombre de tecnologías cuánticas se denota una serie de aplicaciones tecnológicas desarrolladas desde la década de los ochenta, cuyos principios de funcionamiento dependen de varios fenómenos que la física cuántica predice, pero que resultan contraintuitivos a nuestra experiencia cotidiana, como la superposición y el enredamiento cuánticos. En la actualidad, la aplicación de estos fenómenos ha permitido una revolución en la forma en la que comunicamos y procesamos información que promete continuar en las próximas décadas.

En general, los ejes principales de las tecnologías cuánticas incluyen la información, el cómputo, la metrología y el control cuánticos. Un conjunto importante de países alrededor del mundo se ha comprometido a impulsar esquemas de inversión económica e infraestructura en investigación básica y aplicada con el propósito de desarrollar el potencial de estas tecnologías, entre ellos México, que recientemente ha iniciado el desarrollo de un ecosistema en este campo. En un momento en que el mundo avanza hacia una nueva revolución científica, *la información y las tecnologías cuánticas* se han convertido en un eje fundamental para el desarrollo de la ciencia, la industria y la innovación, por lo que se erigen como una línea de desarrollo estratégico para la nación.

En un momento en que el mundo avanza hacia una nueva revolución científica, las tecnologías cuánticas se han convertido en un eje fundamental para el desarrollo de la ciencia, la industria y la innovación.

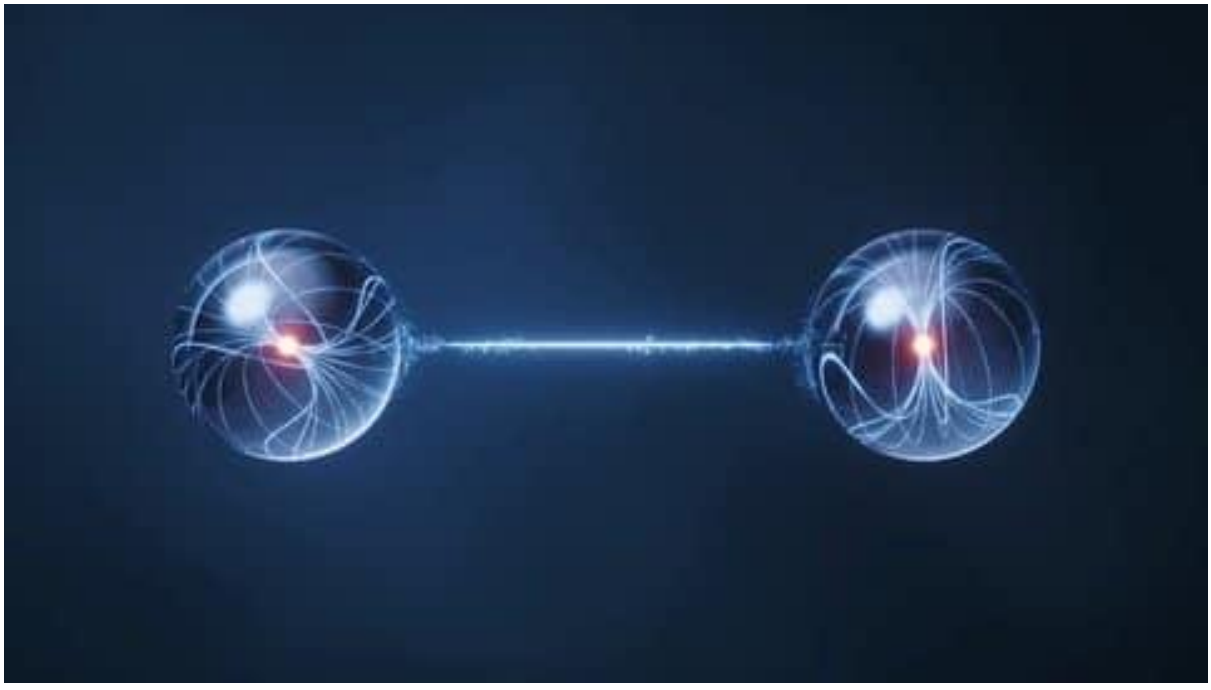


Figura 1: Fenómeno de enredamiento cuántico

Si bien desde hace décadas la mecánica cuántica ha sido una ciencia cultivada en la **UAM**, principalmente en tres departamentos académicos con posgrados en Física, Química y Matemáticas, no fue hasta ahora que surgieron de forma natural proyectos inter y multidisciplinarios para establecer una la línea de conocimiento *Información y Tecnologías Cuánticas* (**IyTC**) bajo un esquema transversal multidepartamental en el que se han incorporado dos posgrados más de ingeniería: Ingeniería Biomédica y Ciencias y Tecnologías de la Información con la participación del Departamento de Ingeniería Eléctrica. La línea de conocimiento se presenta como un frente colaborativo común para el posgrado divisional de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería, en el que, no obstante, falta la integración de los posgrados de Ingeniería Química y de Energía y Medio Ambiente del Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica.

Las ciencias básicas y las ingenierías constituyen un cimiento de la sociedad pues, al formar recursos humanos en áreas estratégicas, traen consigo soberanía, bienestar y desarrollo tecnológico a través de la creación e impulso de proyectos que se hallan en la frontera del conocimiento. En el caso de las tecnologías cuánticas esto incluye diversos campos como el cómputo, la codificación, el sensado (la medición de magnitudes y su conversión en datos), la imagenología, entre otros. Cualquier desafío nacional de este tipo que incluya áreas de rápido crecimiento como las tecnologías cuánticas, requiere entonces formar profesionistas que sean capaces de proponer soluciones con bases sólidas en ciencia básica e ingeniería, pero también con la familiaridad suficiente en temas de frontera que les permita buscar oportunidades laborales, sea en el ámbito académico, gubernamental o privado. La formación disciplinaria en física, ingeniería, matemáticas y químicas enriquece el esfuerzo inter y multidisciplinario en terrenos como el estudio de la materia cuántica, su interacción con la luz, el diseño de nuevas aplicaciones tecnológicas, la aplicación de propiedades cuánticas para el procesamiento de información y el análisis estadístico de datos, o el desarrollo de poderosos sensores.

En el contexto nacional, algunos antecedentes a la **IyTC** de la **DCBI** incluyen el manifiesto elaborado por la División de Información Cuántica (DICu) de la Sociedad Mexicana de Física sobre el ecosistema en tecnologías cuánticas, que se espera construir a nivel nacional e incorpora tanto investigación científica y tecnológica como el ámbito privado; y un Diplomado en Tecnologías Cuánticas como opción de titulación a nivel licenciatura en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Ambos esfuerzos fueron también colaborativos y contaron con la participación de varias instituciones de educación superior y de centros de investigación a nivel nacional.

Es importante destacar que se consideraron tres aspectos principales para desplegar un programa emergente inter y multidisciplinario en *Información y Tecnologías Cuánticas en el Sistema* de Posgrado Divisional (**SPD**) de la División de Ciencias Básica e Ingeniería (**DCBI**) Unidad Iztapalapa:

(1) Aprovechamiento de la infraestructura experimental y teórica generada a lo largo de décadas.

(2) Masa crítica necesaria de recursos humanos especializados del profesorado.

(3) Un interés creciente del alumnado.

El esquema de linea de conocimiento en *Información y Tecnologías Cuánticas* se planteó en el contexto de un recambio generacional del profesorado que se encuentra viviendo la UAM, que integra la experiencia acumulada durante décadas de investigación y docencia y la energía renovada de un profesorado joven que trae consigo ideas novedosas en la docencia, la investigación y la difusión de la cultura.

II. Paradigma

La implementación de un programa piloto emergente de un área de conocimiento inter y multidisciplinaria en *Información y Tecnologías Cuánticas*, tiene como propósito impulsar el aprendizaje y la colaboración entre los diferentes departamentos académicos de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería y posicionar a la **UAM** como una pieza clave en el desarrollo de un ecosistema nacional en el desarrollo teórico y experimental de las tecnologías cuánticas para el beneficio de diferentes sectores de la sociedad.

Paradigma programa emergente inter y multidisciplinario de los posgrados de ciencias básicas e ingeniería de la UAM Iztapalapa para impulsar el aprendizaje multidepartamental.

Es importante enfatizar que el esquema académico multidepartamental de la **UAM** tiene un significado sustantivo para este tipo de posgrados transversales, que excede el terreno disciplinario, donde se comparten profesores, infraestructura con equipos sofisticados y el alumnado puede transitar cursando Unidades de Enseñanza Aprendizaje **(UEA)** en cualquiera de los 16 programas de posgrado de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la **UAM** unidad Iztapalapa.

Entre sus principales áreas de trabajo se encuentran:

· La teoría de la información cuántica, que estudia los límites físicos del procesamiento de información aprovechando las herramientas de la mecánica cuántica.

· Las aplicaciones en física, química, ingenierías y materiales, para comprender fenómenos fundamentales y desarrollar nuevas tecnologías.

· El procesamiento de señales, imágenes y diagnóstico médico, con enfoques innovadores desde la física a la ingeniería.

· La computación cuántica, que abre nuevas posibilidades en simulación, control, optimización y aprendizaje maquinal.

· El análisis matemático de sistemas cuánticos abiertos, enfocado en modelos de evolución no unitaria, procesos de decoherencia y su relación con problemas actuales en información y computación cuántica.

III. Surgimiento y evolución del programa emergente

Por décadas la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la **UAM** unidad Iztapalapa ha cultivado el campo de conocimiento de la mecánica cuántica

a través de líneas de investigación de frontera, proyectos de posgrado novedosos y eventos especializados de carácter nacional e internacional que invita a participar a estudiantes y al profesorado.

El campo de conocimiento de la mecánica cuántica que se ha cultivado por décadas en la UAMI y los eventos especializados permitieron el surgimiento del programa emergente de *Información y Tecnologías Cuánticas*

El primer *Taller de Tecnologías Cuánticas en la Ciencia y las Ingenierías*, organizado por el Departamentos de Física y el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la **UAM** Unidad Iztapalapa del 30 al 31 de julio de 2024, fue un momento clave para que emergiera la línea de conocimiento a nivel posgrado. En ese taller se discutió el significado y el alcance de las tecnologías cuánticas, se reconoció el estado de la cuestión a nivel nacional e internacional y se comprendió su rol central en el futuro tecnológico más allá de la era digital que estamos viviendo. Además, el evento hizo evidente el interés del profesorado y del estudiantado de distintos posgrados y departamentos en el tema, fortaleciendo la certeza de que era preciso desarrollar un programa de posgrado colaborativo y multidepartamental en el área.

El taller se cerró con una mesa de discusión que allanó el camino para la creación de la línea de conocimiento en Tecnologías Cuánticas y Ciencias de la Información en los posgrados de la División de Ciencias Básica e Ingeniería. A partir de esto, en ese mismo año, se dio inicio al programa piloto en el Sistema de Posgrado Divisional de la División de Ciencias Básica e Ingeniería de la **UAM** Unidad Iztapalapa, en el que se impartieron algunas **UEAs**. Estos inicios permitieron identificar los desafíos y superar exitosamente algunos obstáculos iniciales, por ejemplo, en la implementación del enfoque colaborativo en un sistema de 16 posgrados que incluye la participación de coordinadores de posgrado, comisiones académicas, alrededor de 230 personas que componen el núcleo académico básico multidepartamental y un alumnado de más de 400 estudiantes.

En agosto del mismo año se realizó un taller: *Quantum Markov Semigroups and Channels: Special Classes and Applications (24w5240)*, Organizado por el Departamento de Matemáticas de UAM Unidad Iztapalapa. Este taller tuvo lugar en la Casa Matemáticas Oaxaca (CMO), institución mexicana asociada de Banff International Research Station (BIRS) con sede en Canadá, que constituyó un esfuerzo de colaboración entre varios países: México, Italia y Estados Unidos, entre otros, para el desarrollo del marco matemático de las Tecnologías Cuánticas.

Una segunda edición del *Taller de Tecnologías Cuánticas en la Ciencia y las Ingenierías* se llevó a cabo en el verano de 2025, el 11 al 13 de junio. Donde se le dio continuidad al proyecto y se discutieron los resultados del programa piloto que se había implementado.

Un cuarto evento fue el congreso internacional *Applications of Information Theory in Natural Sciences*, organizado por el Departamento de Química, que tuvo lugar del 28 al 31 de enero de 2025, con motivo de la

conmemoración del 50 aniversario de la **UAM**. Sus objetivos fueron fomentar la colaboración entre investigadores e investigadoras interesados en líneas de investigación asociadas con la teoría de la información, tanto clásica como cuántica, y en darle proyección internacional a la **UAM** en estos ámbitos. El evento estuvo dirigido tanto a estudiantes de licenciatura y posgrado como a especialistas en ciencias afines y emergentes.

Otro evento que se desarrolló con el objetivo de atraer estudiantes de licenciatura y posgrado en estos temas a nivel nacional fue la *Escuela de Ciencias de la Información y Tecnologías Cuánticas* (ECIyTC 2025), celebrada en la Casa de la Primera Imprenta del 22 al 25 de septiembre de 2025. La escuela tuvo una gran envergadura, pues participaron más de 100 estudiantes de pregrado y posgrado. Desde la organización de la escuela se planteó la visión de que una escuela dirigida a estudiantes de instituciones nacionales e internacionales tiene una relevancia estratégica para la línea de conocimiento en Información y Tecnologías Cuánticas.

IV. Planteamiento del programa emergente

Una de las primeras preguntas que surgió de la discusión colaborativa entre el profesorado participante en la línea de conocimiento fue la equivalencia y prerrequisitos de conocimientos formativos que resultan cruciales para que un estudiantado diverso proveniente de las ciencias básicas y las ingenierías requiere para estudiar *Información y Tecnologías Cuánticas*.

Se estableció entonces como **UEA** inicial *Elementos de Mecánica Cuántica*, a modo de punto de partida para introducirse en los conceptos fundamentales de la mecánica cuántica, homogeneizar al estudiantado e incursionar en la formación en este campo de estudio.

La UEA de *Elementos de mecánica cuántica* es el eslabón de los conocimientos formativos para que el alumnado proveniente de las ciencias básicas y las ingenierías pueda incursionar en *Información y Tecnologías Cuánticas*

En la Tabla **I.1** se presenta la matriz aproximada de requisitos para los 16 programas de posgrado de la División Ciencias Básica e Ingeniería que considera, de forma general, las **UEA** obligatorias (OB) y las UEA optativas (OP). La propuesta plantea en lo general dos **UEA** obligatorias para concretar la formación en tecnologías cuánticas y otras dos **UEA** electivas dentro de la línea de conocimiento. En esa tabla se presenta que la **UEA** OB1 no es obligatoria en física y química debido a las características curriculares de los programas de estudio, pero resulta un requisito central para las demás **UEA**

UEA	Sistema de Posgrado Divisional de CBI								
	EFMC	MCMAI	PMAT	PCYyTI*	PIB*	PIQ*	PFIS*	PEMA*	PQUIM
OB1									
OB2									
OB3									
OP1									
OP2									
OP3									

Tabla I: 1 Matriz de posgrados: Información y Tecnologías Cuánticas vs UEA

OB: Obligatoria; **OP:** Optativa;* Posgrados con maestría y doctorado; **EFMC:** Especialidad en Física Médica Clínica; **MCMAI:** Maestría en Ciencias en Matemáticas Aplicadas e Industriales; **PCyTI:** Posgrado en Ciencias y Tecnologías de la Información; **PIB:** Posgrado en Ingeniería Biomédica; **PIQ:** Posgrado en Ingeniería Química; **PFIS:** Posgrado en Física; **PEMA:** Posgrado en Energía y Medio Ambiente; **PQUIM:** Posgrado en Química.

V. Implementación de programa piloto

Las propuestas para el arranque del programa piloto en *Información y Tecnologías Cuánticas* que pueden actuar como **UEA** obligatoria u optativa, dependiendo del programa de posgrado, fueron las siguientes:

· Elementos de Mecánica Cuántica (EMC).

· Introducción a la Información y Cómputo Cuánticos (IICC).

· Ciencias de la Información.

· Cómputo Cuántico (con Qiskit).

· Teoría de Sistemas Cuánticos Abiertos.

Se desarrollaron los planes y programas de estudio de estas UEA de acuerdo con los lineamientos específicos dentro del alcance de la legislación universitaria. Evidentemente, estas UEA son nuevas y no figuran en las bases de datos de los sistemas escolares, es decir, no poseen una clave.


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Casa abierta al tiempo
Unidad Iztapalapa
Ciencias Básicas e Ingeniería
CBI
Oferta de UEA
Tecnologías Cuánticas y Teoría de la Información
UEAs para el trimestre 26-P
Elementos de Mecánica Cuántica
Profesores: Adrián Mauricio Escobar Ruiz y Jorge Bolaños Servin
UEA fiducial: Temas Selectos de Análisis I
Clave: 2137041
Posgrado en Matemáticas
Ciencias de la Información
Profesor: Humberto Laguna Galindo
UEA fiducial: Química Cuántica Avanzada
Clave: 2146052
Posgrado en Química
Temas Selectos de Ciencias de la Información
Profesor: Robin Preenja Sagar
UEA fiducial: Fisicoquímica Computacional
Clave: 2146055
Posgrado en Química
Introducción a la Información y al Cómputo Cuánticos (IICC)
Profesor: Isaac Pérez Castillo
UEA fiducial: Temas Selectos de Mecánica Cuántica
Clave: 2116043
Posgrado en Física
Más información:
Dr. Gilberto Espinosa Paredes
Coordinador Divisional de Posgrado CBI
gepe@xanum.uam.mx

Para arrancar el programa piloto, en sincronía y con el apoyo de las coordinaciones de posgrados, se plantearon abrir las "UEA Fiducial" con el contenido de las UEA propuestas para el campo de conocimiento Información y Tecnologías Cuánticas.

Actualmente, se han pilotado y propuesto nuevas **UEA**, incluyendo: Introducción al Hardware para Computadoras Cuánticas, Criptografía Cuántica, Aprendizaje Maquinal Cuántico, Temas Selectos de Ciencias de la Información y Temas Selectos de Tecnologías Cuánticas.

VI. Resumen de resultados

Gracias al entusiasmo de los colegas participantes en la línea de conocimiento en Información y Tecnologías Cuánticas y a la difusión por parte de todos los sectores institucionales, desde la Dirección de la División y los Coordinadores de Posgrado hasta las Jefaturas de Departamentos y de Áreas Académicas, la implementación piloto del programa ha marchado exitosamente. Se ha logrado mantener el flujo del estudiantado de la **UAM** y, gracias a los eventos antes mencionado, la iniciativa se ha difundido a nivel nacional entre el profesorado y el estudiantado de otras instituciones, afianzándose como la primera iniciativa de su tipo a nivel nacional.

En el trimestre 25-I arrancó el programa piloto en *Información y Tecnologías Cuánticas*.

Los desafíos actuales de la línea de conocimiento incluyen: proporcionar una oferta constante de las **UEA**, una demanda continua del estudiantado en el Posgrado Divisional **(Tabla I.2)**, garantizar que el estudiantado curse por el esquema completo, progresar oficialmente en la incorporación del programa en el campo de conocimiento de *Información y Tecnologías Cuánticas* en los planes de estudio de los posgrados involucrados y extender el proyecto a programas de posgrado en otras Unidades de la UAM, como es el caso de la Unidad Azcapotzalco, donde ya ha habido participación de estudiantes en el programa piloto.

Trimestre en el Calendario UAM				
UEA	**25-I** (del 10 de febrero al 09 de mayo de 2025)	**25-P** (Del 26 de mayo al 15 de agosto de 2025)	**25-O** (del 01 de octubre al 19 de diciembre de 2025)	**26-I** (del 19 de enero al 10 de abril de 2026)
Elementos de Mecánica Cuántica				
Introducción a la Información y Cómputo Cuánticos				
Ciencias de la Información				
Computo cuántico				
Teoría de sistemas cuánticos abiertos				
Hardware cuántico				
Criptografía cuántica				
Aprendizaje Maquinal Cuántico*				

Tabla II: .2 Programa piloto por trimestres: UEA vs Trimestre

* UEA de reciente creación: se ofertará después de la **UEA** de cómputo cuántico.

VII. Alianza entre la UAM y Eurecat para impulsar tecnologías cuánticas

El 4 de diciembre de 2025, la Universidad Autónoma Metropolitana (**UAM**) dio un paso importante en su estrategia de internacionalización al firmar una carta de intención con Eurecat, el principal centro tecnológico de Cataluña. El acuerdo establece una ruta de trabajo para impulsar proyectos conjuntos en innovación, transferencia de conocimiento y formación especializada, al tiempo que amplía la vinculación con los sectores productivos y públicos.

Se estableció la posibilidad de crear unidades tecnológicas mixtas que integren equipos de ambas instituciones para proyectos en áreas estratégicas, como las tecnologías cuánticas, campo con el que iniciará la colaboración en enero de 2026.

Consorcio UAM-Eurecat paso importante en su estrategia de internacionalización para crear unidades tecnológicas mixtas en tecnologias cuánticas



Firma de la carta de intención por parte de la **UAM** y de **Eurecat**, principal centro tecnológico de Cataluña. De izquierda a derecha: Isaac Pérez Castillo[1], eje fundamental de la iniciativa; Gilberto Espinosa Paredes[1], coordinador divisional de posgrado; Aurea Rodríguez, directora corporativa de Fundación Eurecat; Rafael Bojalil Parra[2], director de Apoyo

a la Investigación y Posgrado (En representación del Rector General, Gustavo Pacheco López); Luis Fernando Castro Careaga[1] secretario académico (En representación del Director de la División de CBI, Román Linares Romero); Lesly Adriana Fernández[2], jefa del Departamento de Procuración de Recursos Extraordinarios. [1] **DCBI de la Unidad Iztapalapa;** [2] **Rectoría General de la UAM**

https://boletines.uam.mx/archivos/la-uam-y-eurecat-formalizan-alianza-para-impulsar-innovacion-aplicada-numero789/?fbclid=IwdGRjcAoSVZ5jbGNrA6xU52V4dG4DYWVtAjExAHNydGMGYXBWX2lkDDM1MDY4NTUzMTcyQABHhZegqzu6Dlm8P2yMnLZrGx26WQOB5gNr-JOB_Scra0RDQW5WrxWgWYikaFX_aem_-JN_YHo8id8d9tKunM9rA

VIII Reflexión final y llamado a la comunidad universitaria

El programa emergente de Información y Tecnologías Cuánticas del Sistema de Posgrado Divisional de la DCBI en la UAM-Iztapalapa constituye una experiencia pionera en el ámbito de las universidades públicas mexicanas. Su carácter transversal, su articulación interdepartamental y su alineación con prioridades nacionales e internacionales lo convierten en una iniciativa estratégica para el fortalecimiento del posgrado y para la formación de recursos humanos altamente especializados[1].

El programa emergente no solo mira al futuro de las tecnologías cuánticas, sino también al futuro de la universidad pública como motor de desarrollo científico, tecnológico y social del país

Más allá de los resultados inmediatos, **IyTC** representa una apuesta institucional de largo plazo: demostrar que es posible innovar en la estructura académica del posgrado, responder a campos emergentes del conocimiento y, al mismo tiempo, preservar la calidad y el rigor que han caracterizado históricamente a la **UAM**[2]**.**

Invitamos a la comunidad universitaria —estudiantes, profesores, investigadores y autoridades— a sumarse a este esfuerzo colectivo, ya sea cursando las **UEA** de **IyTC**, participando en los eventos académicos organizados, o colaborando en los proyectos de investigación que se deriven de este programa estratégico[3]. En este sentido, el programa no solo mira al futuro de las tecnologías cuánticas, sino también al futuro de la universidad pública como motor de desarrollo científico, tecnológico y social del país[4].

Reconocimientos

A Román Linares Romero (Exdirector de la División de CBI) por su amplia contribución en la memoria histórica de **UAM**, y el desarrollo de la Sección VIII. El Programa emergente de *Información y Tecnologías Cuánticas* no sería posible sin el apoyo de las jefaturas de departamento y coordinadores/ras del posgrado de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería.

Jefaturas de Departamento: Claudia Rojas Serna (Ingeniería de Procesos e Hidráulica); Omar Lucio Cabrera Jiménez (Ingeniería Eléctrica); Juan Marcos Esparza Schultz (Química); Juan Morales Corona (Exjefe de Departamento de Física); José Raúl Montes de Oca Macharro (Matemáticas).

Coordinadores/ras del Sistema de Posgrado Divisional: Orlando Guzmán López (Física), Francisco Javier Tzompatzin Morales (Química), Mario Pineda Ruelas (Matemáticas), Guadalupe Ramos Sánchez (Ingeniería Química), Norma Castañeda Villa (Ingeniería Biomédica), Luis Alberto Vásquez Toledo (Ciencias y Tecnologías de la Información), Hernándo Romero Paredes (Energía y Medio Ambiente), Joaquín Delgado Fernández (Excoordinador de Maestría en Matemáticas Aplicadas e Industriales), Silvia Sandra Hidalgo Tobón (Especialización en Física Médica Clínica).

[1] SE. (2023). Formación de recursos humanos en áreas estratégicas. Secretaría de Educación.

[2] UAM. (2025). Visión estratégica 2030 de la UAM. Documento rectoral.

[3] SPD-CBI. (2025). Invitación a la comunidad universitaria. Comunicado interno.

[4] UAM. (2025). La universidad pública como motor de desarrollo. Documento de posicionamiento institucional.

Referencias

[1] Bastarrachea-Magnani, M. A. (2025). *El horizonte de las tecnologías cuánticas*. Bol. Soc. Mex. Fís. 39 (1), 31-42.

[2] Bolaños J., Carlen E., Umanità V., Wiedemann A. (2024). CMO Workshop: Quantum Markov Semigroups and Channels: Special Classes and Applications 24w5240. https://www.birs.ca/cmo-workshops/2024/24w5240/report24w5240.pdf

[3] Esquivel R. (2025). Escuela de Ciencias de la Información y Tecnologías Cuánticas (ECIyTC 2025). Discurso de apertura, Casa de la Primera Imprenta, Cd. De México, enero de 2025. https://sites.google.com/izt.uam.mx/escueladetiytc/p%C3%A1gina-

[4] División de Información Cuántica (DICu) de la Sociedad Mexicana de Física (SMF). (2023). Iniciativa Mexicana en Tecnologias Cuanticas. Unidad de Publicaciones y Difusion del Instituto de Investigaciones en Matematicas Aplicadas y en Sistemas. Ciudad de México: UNAM.

[5] Dowling, J. P. y Milburn G.J. (2003). Quantum technology: the second quantum revolution. Phil. Trans. R. Soc. A. 361, 1655.

[6] García Chung, A. A., Laguna H., Sagar R., Esquivel R., Escobar Ruiz, A. M., Bastarrachea-Magnani, M. A., Bolaños Servin, J., Ríos Cangas, J. I., Benítez Rodríguez, E. Escuela en Ciencias de la Información y Tecnologías Cuánticas. https://sites.google.com/izt.uam.mx/escueladetiytc/p%C3%A1gina-principal

[7] Laguna H., Sagar R., Esquivel R., Salazar S. (2025). Commemorating the 50th Anniversary of Universidad Autónoma Metropolitana: Applications of Information Theory in Natural Sciences.

[8] Hernández Pozos J.L., Castellanos Abrego N. P., Bastarrachea-Magnani M.A. (2024; 2025). Taller de tecnologías cuánticas en la ciencia y las

ingenierías. Terraza de posgrado, UAM-I. https://sites.google.com/izt.uam.mx/tecnologiascuanticasuami/p%C3%A1gina-

[9] Méndez Fragoso, R. (2023). Diplomado en Tecnologías Cuánticas. Secretaria de Educación Abierta y Continua. Facultad de Ciencias, UNAM. https://educontinua.fciencias.unam.mx/Pagina2023/diplomados/TecnologiasCuanticas/T

[10] Nielsen, M. A., Chuang, I. L. Quantum Computation and Quantum Information. 10th Anniversary Edition. Cambridge University Press, New York, 2010.

[11] Riedel, M., Kovacs, M. Zoller, P., Mlynek, J., and Calarco, T. (2019). Europe's Quantum Flagship initiative. Quantum Sci. Technol. 4, 020501.



La ciencia detrás del secado solar

Autores:

- **Mtr.Carlos Castañeda Zuluaga[1]**
- **Dra.Yuridiana Rocío Galindo Luna[1]**
- **Dr.Fernando Gabriel Arroyo Cabañas[2]**

[1] **UAM Iztapalapa**

[2] **UACM-San Lorenzo Tezonco**

Abstract
Solar drying is a food preservation technique that has become technologically advanced and evolved as a sustainable alternative to electric or fossil fuel methods. Indirect solar drying systems allow food to be dehydrated using air heated by solar radiation, reducing postharvest losses and contamination risks. These devices, affordable for small producers, combine heat and mass transfer processes to ensure a final moisture content of less than 10%, extending food shelf life. Their implementation contributes to reducing waste and associated greenhouse gas emissions.

Index words: solar drying, sustainability and ecotechnologies

Resumen
El secado solar es una técnica de El secado solar es una técnica de conservación alimenticia, se ha tecnificado y evolucionado tecnológicamente como alternativa sostenible frente a métodos eléctricos o de combustibles fósiles. Los sistemas de secado solar indirecto permiten deshidratar alimentos mediante aire calentado por radiación solar, reduciendo pérdidas postcosecha y riesgos de contaminación. Estos equipos, son accesibles para pequeños productores, combinan fenómenos de transferencia de calor y masa que aseguran un contenido final de humedad menor al 10%, extendiendo la vida útil de los alimentos. Su implementación contribuye a disminuir desperdicios y emisiones asociadas a los gases de efecto invernadero.

Palabras clave: secado solar, sostenibilidad y ecotecnologías.

Introducción

La conservación de los alimentos con el sol es una técnica implementada desde hace miles de años, la humanidad ha conservado sus alimentos mediante el deshidratado, sus primeros indicios del uso del sol se encuentran en el secado de carne y granos en culturas antiguas, pero el secado tecnificado se encuentra en la primera instalación de secado mediante energía solar en el sur de Francia y data de alrededor del año 8000 a. C. (Belessiotis y Delyannis, 2011). Posteriormente el secado evoluciono a una práctica artesanal y científica para obtener diferentes texturas y sabores que proporcionaban en la gastronomía una rica gama de essencias. Existen indicios que las culturas de medio oriente, utilizaban el sol para secar alimentos ya en el año 12 000 a.C. generando a futuro un gran mercado de mercado de especias (Ungvarsky, 2024). Las técnicas de secado a sol abierto, siguen siendo utilizadas hoy día, sin embargo, en las zonas dentro y cerca de las grandes urbes debido a la contaminación ambiental, inclemencias climáticas y seres vivos que puedan afectar los alimentos expuestos, estas prácticas pueden resultar en perdidas o contaminación alimenticia (Schmutz *et al.,* 2023). Dentro de las soluciones actuales se han sustituido el secado convencional al sol, con tecnologías de deshidratación que usen electricidad o combustibles, con costos altos de infraestructura y uso que los hacen inaccesibles para los pequeños y medianos productores en zonas urbanas y rurales. El secado solar indirecto, es otra de las soluciones para llevar a cabo el proceso de deshidratado, siendo más económicas que las tecnologías semiindustriales e industriales. Esta forma de procesar los alimentos requiere de depósitos o estructuras, que permiten la transmisión de la radiación solar

sobre el alimento o que utilicen la radiación solar para calentar un flujo de aire controlado, extrayéndolo con ventiladores o de manera pasiva al moverse por su cambio de densidad. Las ecotecnologías de aprovechamiento solar son herramientas que solucionan esta problemática, se calcula que las pérdidas postcosecha en México son de alrededor de 25% en promedio (Desarrollo Agropecuario Integral Camino Real, 2022)., mundialmente los desperdicios alimenticios vegetales representan entre el 8% y el 10% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2024).

Es por ello que es importante diseñar y fabricar dispositivos que puedan solucionar esta problemática que afecta principalmente a productores con poco acceso a tecnologías de conservación y con falta de movilidad de sus productos, proporcionando una forma de revalorización de los alimentos generando opciones para su aprovechamiento.

¿Cómo funciona el secado solar indirecto?

Cuando se utiliza un prototipo de secado, como el que se muestra en la Figura 1, tanto en este prototipo como en los tipos indirectos, o estructuras más complejas, los alimentos se cortan en trozo o en rodajas, para evitar que le epidermis (barrera natural del alimento) evite la deshidratación de la fruta, debido a que esta funciona como barrera natural para la transpiración del fruto.



Figura 1: Prototipo de deshidratador solar.

Al cortarse en rodajas se expone el interior del fruto, dentro de ella se tiene un contenido de fibra que encapsula agua de dos tipos: 1) libre (agua ligeramente asociada con la fibra) y 2) agua ligada (agua ligada a otras moléculas y componentes del fruto), formando un material poroso se ejemplifica en la Figura 2.

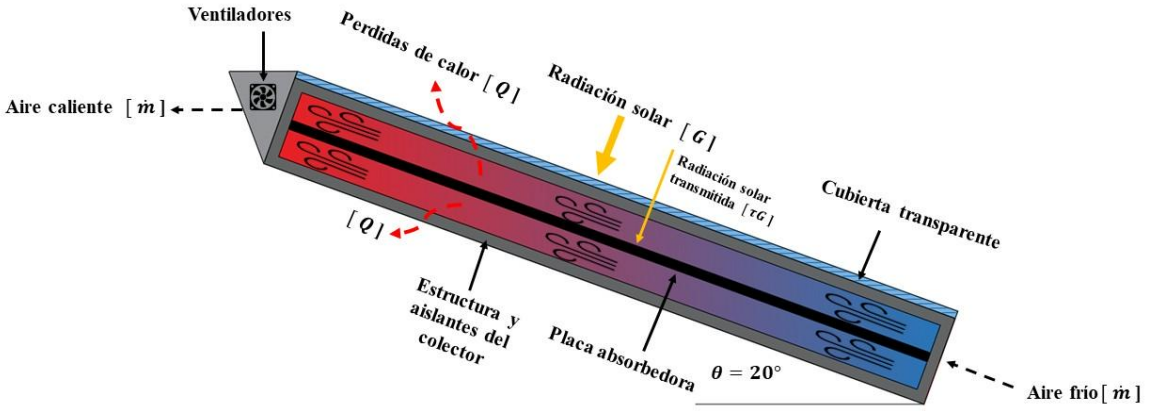


Figura 2: Funcionamiento del colector solar.

Dentro del prototipo ocurren varios fenómenos de transferencia de calor y masa en primera instancia tenemos el colector solar, equipo que permite la entrada de la radiación que incide en la superficie de una placa absorbente, elevando su temperatura y cediendo calor al aire circundante dentro del colector, calentándolo gracia al efecto invernadero. El aire se mueve de manera pasiva por el cambio de densidad o mediante ventiladores que ayudan a mejorar la transferencia de calor, las interacciones energéticas se observan en la Figura 3.

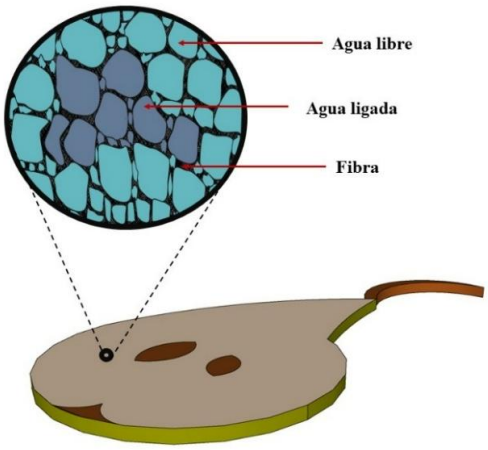


Figura 3: Porosidad de las frutas.

El balance de energía de un colector se describe de la siguiente forma.

$$[Energía\ indicente\ en\ la\ placa] + [trabajo\ de\ los\ ventiladores] = [calor\ útil\ del\ aire] + [pérdidas\ de\ calor\ globales]$$

O de la forma matemática.

$$\tau_{vidrio}\alpha_{placa}A_{placa}G + P_V = \dot{Q}_{util} + \dot{Q}_{p,globales} \quad (1)$$

La masa se conserva, por lo tanto:

$$\dot{m}_{salida} = \dot{m}_{entrada} \quad (2)$$

Posteriormente el aire caliente entra a la cámara de secado, y forzado por otro ventilador colocada en la parte superior, el aire recorre la cámara de secado, reptando por los alimentos, transmitiendo calor, generando un cambio de fase en la humedad superficial del alimento. Esta parte del equipo recibe en su parte frontal una fracción de la radiación que ayuda al secado, compensando las pérdidas de calor por paredes, además existe una caída natural de temperatura gracias a la vaporización del agua de los alimentos, el funcionamiento de la cámara de secado y sus interacciones energéticas se visualizan en la Figura 4.

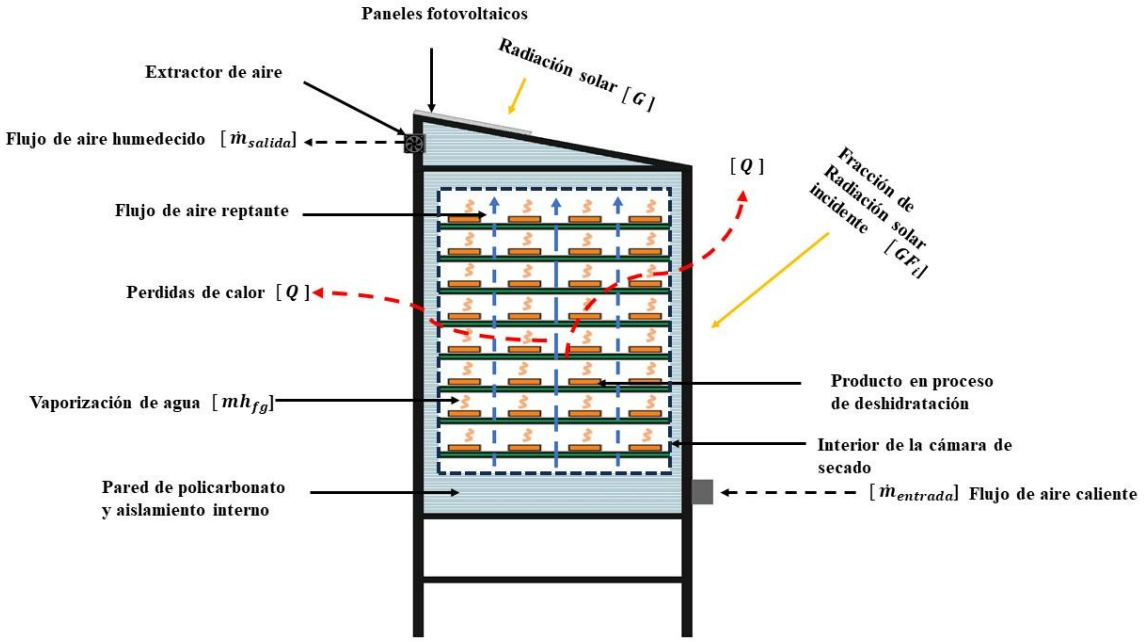


Figura 4: Funcionamiento de la cámara de secado

El balance energético de la cámara de secado es:

$$\dot{Q}_{incidente} + P_{extractor} + \dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{perdidas} + \dot{Q}_{vaporización} + \dot{Q}_{salida} \quad (3)$$

El balance de masa de la cámara de secado es:

$$\dot{m}_{salida} = \dot{m}_{entrada} + \dot{m}_{vapor} \quad (4)$$

El proceso de deshidratación se muestra en la Figura 5: a) Inicia con el lavado y desinfección del fruto, b) seguido del corte en rodajas, c) posteriormente, las rodajas de 3 mm se colocan en las charolas con una separación de entre 2 y 3 cm, para luego introducirse en la cámara de secado. Este proceso puede llevarse a cabo en un horario de 9:00 a 18:00 horas, d) finalmente extrayéndose cuando su contenido de humedad este

por debajo del 10%. Dentro del equipo, la fruta experimenta una transferencia de calor, la cual se interpreta mediante la ecuación 5. Esto provoca un fenómeno de cambio de fase del agua superficial y una transferencia de masa asociado de la deshidratación, que se describe con la ecuación 6. Ambas ecuaciones pueden acoplarse para establecer la relación entre la transferencia de calor y la de masa, lo que matemáticamente se expresa en la ecuación 7.

$$\frac{dQ}{dt} = h_c A(T_a - T_s) \qquad (5)$$

$$\frac{dD}{dt} = -k_m A(H_a - H_s) \qquad (6)$$

$$\frac{dD}{dt} = \frac{h_c A(T_a - T_s)}{h_{fg}} \qquad (7)$$

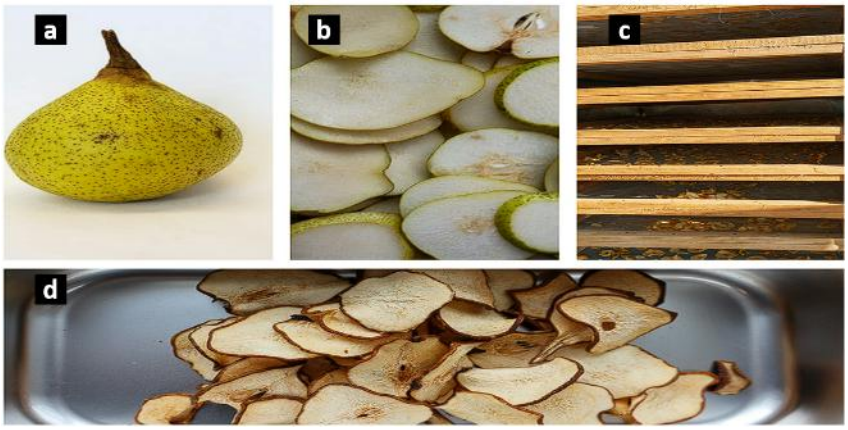


Figura 5: Proceso de deshidratación.

Los fenómenos de transporte se visualizan en la Figura 6, donde se ilustra donde se ilustra el flujo reptante de aire caliente, la difusión causada en el fruto y el posterior arrastre de la humedad en el flujo. El fruto al perder concentración de masa en su superficie, por el fenómeno de difusión el agua interior es obligada a moverse hacia las áreas exteriores.

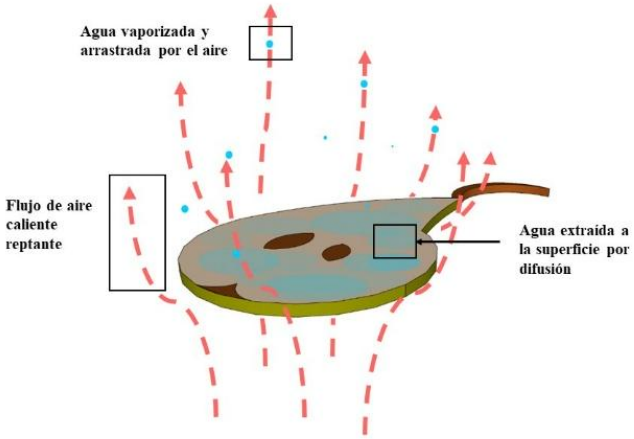


Figura 6: Transferencia de calor y masa en el fruto.

Finalmente, después de un periodo de entre 1-3 días, dependiendo el cargamento del secador, el producto habrá perdido una gran cantidad de agua, un secado de calidad se considera cuando el producto conserva un porcentaje menor a 10% de agua, esto garantiza una actividad de agua menor a 0.45, propiedad de los alimentos que indica el potencial de crecimiento bacteriano, Se extrae el producto y siguiendo buenas prácticas de higiene, se empaca y se sella para evitar una rehidratación (ver Figura 7), obteniendo un producto con la capacidad de conservación en empaque de entre 6 meses hasta 24 meses.



Figura 7: Productos deshidratados empacados.

Referencias

[1] Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar Energy*, 85(8), 1665–1691. https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.001

[2] Ungvarsky, J. (2024). *Solar drying.* EBSCO Research Starters: Applied Sciences. Recuperado de https://www.ebsco.com/research-starters/applied-sciences/solar-drying

[3] Schmutz, P., Hoyle, E. H., & Hoover, A. (2023, 30 de junio). *Drying foods* (HGIC Fact Sheet No. 3080). Clemson University Cooperative Extension Service.

https://hgic.clemson.edu/factsheet/drying-foods/

[4] Desarrollo Agropecuario Integral Camino Real. (2022, 26 de septiembre). *La poscosecha y la pérdida de alimentos*. CIMMYT. Recuperado de https://www.cimmyt.org/es/noticias/la-poscosecha-y-la-perdida-de-alimentos/

[5] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2024, 27 de marzo). *El mundo desperdicia más de 1.000 millones de platos de comida al día* [Comunicado de prensa]. Recuperado de https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/el-mundo-desperdicia-mas-de-1000-millones-de-platos-de

Las células cancerosas descubren otros mundos al hacer metástasis



Dr. Juan Carlos Gallardo Pérez
Departamento de Fisiopatología Cardio-Renal, Instituto Nacional de Cardiología, Ignacio Chávez.

Dr. Álvaro Marín Hernández
Departamento de Bioquímica, Instituto Nacional de Cardiología, Ignacio Chávez.

Dra. Diana Xochiquetzal Robledo Cadena
Departamento de Bioquímica,Instituto Nacional de Cardiología, Ignacio Chávez.

M en C. Cristina Trejo Solís
Lab. Experimental de Enfermedades Neurodegenerativas, Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía "MVS".

Imagen Colección del autor

Abstract
Metastasis is the process by which cancer cells migrate from their tissue of origin to colonize a distant site within the body. It begins with the expression of proteins that allow their migration through the blood vessels. Metastasis is the main cause of death from cancer, therefore, knowing its mechanisms will allow the design of targeted therapeutic strategies.

Keywords Metastasis, migration, invasiveness, cancer.

Resumen
La metástasis es el proceso por el cual las células cancerosas migran desde su tejido de origen para colonizar un sitio alejado dentro del organismo. Comienza con la expresión de proteínas que permiten su migración a través de los vasos sanguíneos. La metástasis es la principal causa de muerte por cáncer por lo que conocer sus mecanismos permitirá diseñar estrategias terapéuticas dirigidas.

Palabras clave: Metástasis, migración, invasión, cáncer.

Introducción

El arte de la metástasis.

Cuando se escucha la palabra metástasis, en la sala de algún hospital o en cualquier lugar, inmediatamente viene a la mente lo peor para los familiares y para el paciente con cáncer. Las estadísticas no mienten ya que la metástasis es la responsable de más del 90% de las muertes asociadas al cáncer. La metástasis es el término general usado para describir la diseminación de las células cancerosas del tumor primario (*in situ*, es decir, en el lugar que le dio origen), hacia el torrente sanguíneo y después, hacia otros órganos distantes en donde coloniza y vuelve a crecer, siendo esta la causa principal de mortalidad por compresión de órganos y pérdida de su funcionalidad. El cáncer de mama, por ejemplo, es uno de los principales tumores sólidos malignos que afectan a las mujeres en México y en el mundo y los tratamientos continúan siendo poco eficaces debido a que el tumor se detecta en etapas tardías, cuando ya ha crecido demasiado o está diseminado en la sangre, pero principalmente a que las terapias no son *dirigidas* ni *específicas* a las células del cáncer, ni mucho menos, a las células de cáncer pre-metastásicas. Por la naturaleza multifactorial de su origen y la ineficacia de sus tratamientos, muchos tipos de cáncer se presentan día a día en la población humana, en pulmón, en páncreas, en cerebro, en huesos, en la sangre, en casi todos los órganos, levemente exceptuando el corazón. En el corazón, los tumores malignos que se desarrollan se conocen como mixomas y tienen una frecuencia muy baja del 0.5 por millón de personas por año. Además, la presencia de estos mixomas es tan rara que solo algunos casos familiares lo presentan. Particularmente está asociado con el complejo de Carney (una enfermedad heredable). Fuera de estos casos raros el cáncer, a causa de la metástasis, continúa siendo una enfermedad mortal alrededor del mundo. El arte de esta enfermedad consiste en utilizar los mecanismos e incluso las células que el mismo organismo ya conoce. El crecimiento y la migración ya se ha efectuado durante el desarrollo embrionario y ahora, en la enfermedad, el cáncer los vuelve a utilizar. Por ello permítasenos la expresión: *la carcinogenia recapitula la embriogenia.*

El camino inicial de la metástasis

El largo camino que siguen las células malignas hacia la metástasis comienza cuando se origina la primera célula tumoral, aquella que ha adquirido mutaciones en genes específicos (ocasionado por múltiples factores, como la exposición prolongada a compuestos químicos nocivos, luz solar, radiaciones, virus y demás factores ambientales) y que le permiten tener una proliferación descontrolada y formar un cúmulo inicial de células con capacidad de crecimiento irrestricto. Cuando hablamos de un tumor es necesario indicar si es benigno (como es el caso de la mayoría de los lunares que todos presentamos en la piel, algunos miomas, adenomas u osteomas) en cuyo caso las células dejan de proliferar después de algún tiempo sin complicaciones mayores para el individuo. Sin embargo, a partir de mutaciones en genes específicos, otras células no tienen la misma suerte y comienzan a proliferar descontroladamente generando más células que dan como resultado la formación de un tumor maligno. Este es el tumor primario y puede medir unos cuantos centímetros y el cual, si se detecta a tiempo, puede ser tratado o retirado quirúrgicamente con pocas complicaciones para el paciente. Imaginemos ese tumor primario como una construcción sólida, una pared, en la que cada tabique es una célula y se encuentra fuertemente adherida a la otra por el cemento. En este escenario es bastante posible manejar y controlar el cáncer porque es *inmóvil*. En las células del tumor primario las uniones intercelulares (las que dan la adhesión) quedan establecidas por la presencia de la proteína E-cadherina lo que permite el crecimiento sólido multitudinario de células y que, conforme va creciendo el tumor sólido, va induciendo el alejamiento de los vasos sanguíneos unos de otros, lo que permite la generación de zonas con baja disponibilidad de oxígeno y de nutrientes y la expresión del factor inducido por hipoxia ((HIF-1α)) que controla el metabolismo de las células cancerosas. Lo anterior favorece un ambiente de presión selectivo que al paso del tiempo induce la aparición de un fenotipo maligno invasivo. La gran mayoría de los tumores malignos en esta etapa primaria no generan síntomas claramente visibles por lo que la mayoría de las personas no los detecta o, si se presentan síntomas, los pacientes los pueden llegar a confundir con otras enfermedades menos riesgosas. También, aunado a esto se encuentra el hecho de que las personas no se preocupan por su salud y no deciden acudir a una revisión médica. La prevención es la base de la curación de esta enfermedad hasta ahora.

En esta etapa de tumor primario las células *avisan* si van a hacer metástasis o no. Lo anterior es fundamental para saber qué tipo de tratamiento se debe seguir para cada paciente. Lamentablemente, esta información no se ha establecido ni se ha incorporado a los esquemas de tratamiento los cuales no están dirigidos a ningún mecanismo pre-metastásico sino simplemente a la proliferación. Como las células tumorales malignas no son las únicas que proliferan en nuestro organismo, muchas células normales en nuestros tejidos también son susceptibles de morir debido al tratamiento antitumoral actual. La célula pre-metastásica avisa que se va a empezar a mover, con la expresión de proteínas específicas, (vimentina, citoqueratina y muchas otras más las cuáles pudieran servir como biomarcadores de progresión tumoral)

aquellas que le permiten la movilidad, su camino inicial hacia la metástasis. Terapias dirigidas hacia estas proteínas que son específicas de la pre-metástasis no se han diseñado o evaluado en pacientes hasta ahora. Existen modelos en el laboratorio de tumores sólidos (esferoides tumorales) que nos pueden permitir, aisladamente en el laboratorio, estudiar la pre-metástasis (Figura 1).

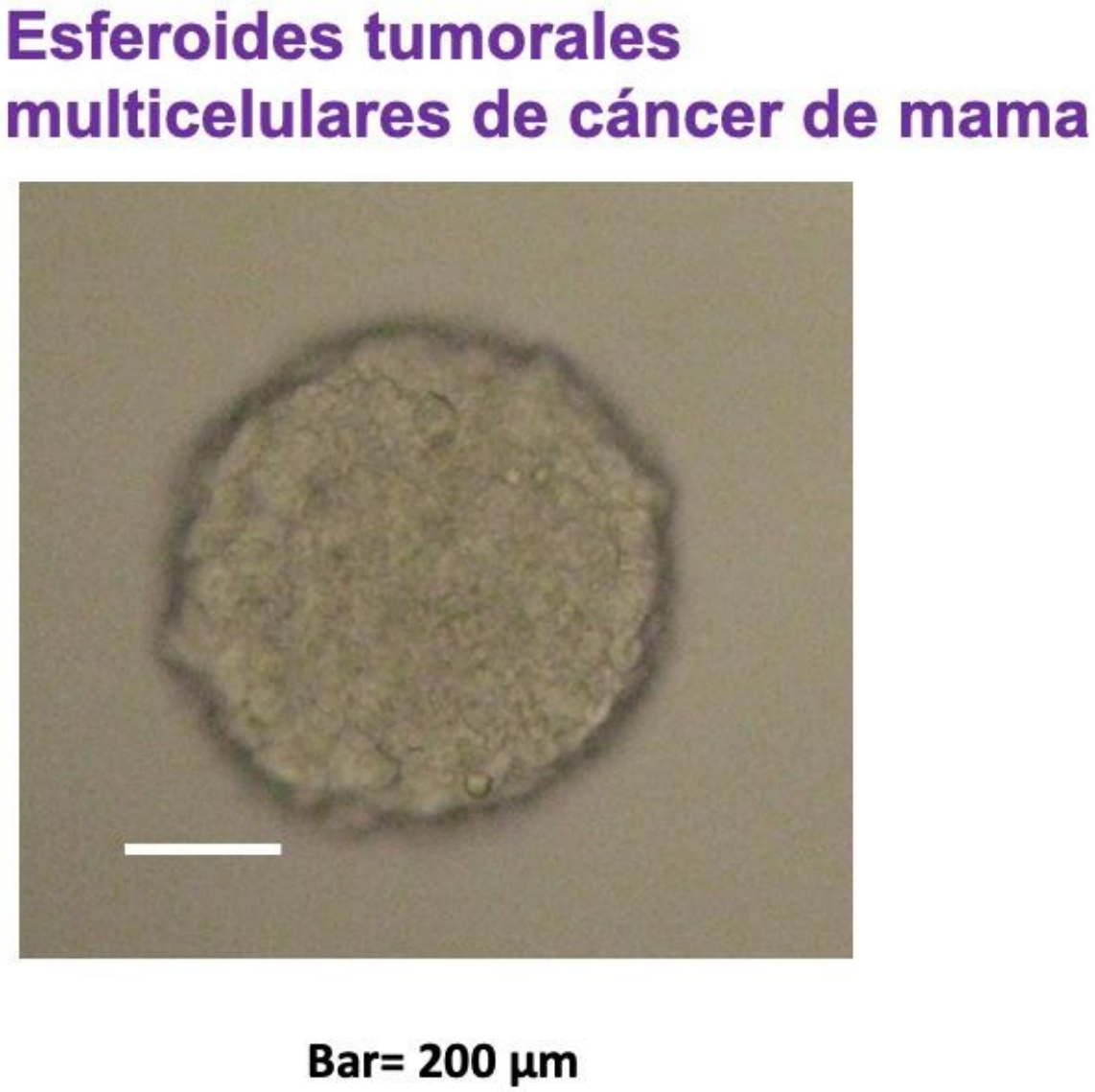


Figura 1: Modelo in vitro de microtumores en desarrollo.

El desprendimiento inicial y la ruta hacia la sangre

Para que las células tumorales malignas puedan migrar hacia el torrente sanguíneo necesitan desprenderse del tumor sólido primario. Este proceso requiere que los tabiques de nuestra construcción sólida comiencen a perder la unión que los mantiene entrelazados y que los tabiques se alarguen permitiendo liberarse de dicha pared imaginaria. Esto ocurre en el tumor sólido para hacer metástasis. Las células que anteriormente estaban fuertemente pegadas entre sí comienzan a perder sus uniones intercelulares (por medio de la *desaparición* de la proteína E-cadherina,

a través del estrés microambiental del tumor maligno que favorece que esta proteína deje de expresarse). Este estrés microambiental al que las células están expuestas incluye no solo la baja disponibilidad de oxígeno sino también de nutrientes y la exposición a fármacos antineoplásicos o a la radiación. Además, el tumor comienza a recibir señales extracelulares provenientes de fibroblastos asociados al cáncer (o incluso de ellas mismas, lo que se conoce como señalización autocrina) en forma de moléculas como las citocinas, quimiocinas o factores de crecimiento que les inducen a secretar proteasas de matriz extracelular que son un tipo de proteínas que actúan como tijeras que el cáncer usa para romper la matriz extracelular y escapar de los tejidos. Las células que comienzan a desprenderse también cambian su forma, se alargan (adquieren un fenotipo fibroblastoide, es decir, alargado) y producen proteínas de migración como vimentina, fibronectina y citoqueratina) lo que les permite moverse a través de la matriz extracelular para alcanzar los vasos sanguíneos. No todas las células del tumor sólido tienen estas capacidades o han sido seleccionadas para tal fin, solo algunas pueden alcanzar este fenotipo de movilidad. ¿De qué depende? De sus características intrínsecas como capacidad de adaptabilidad y fenotipo troncal. Todo lo anterior se conoce como transición epitelio-mesénquima (TEM) y es uno de los mecanismos más aceptados para la progresión de un tumor primario hacia la metástasis (Figura 2). Cabe mencionar que este mecanismo no es utilizado por las leucemias u otros tipos de cáncer en la sangre ya que éste ya tiene acceso al torrente sanguíneo.

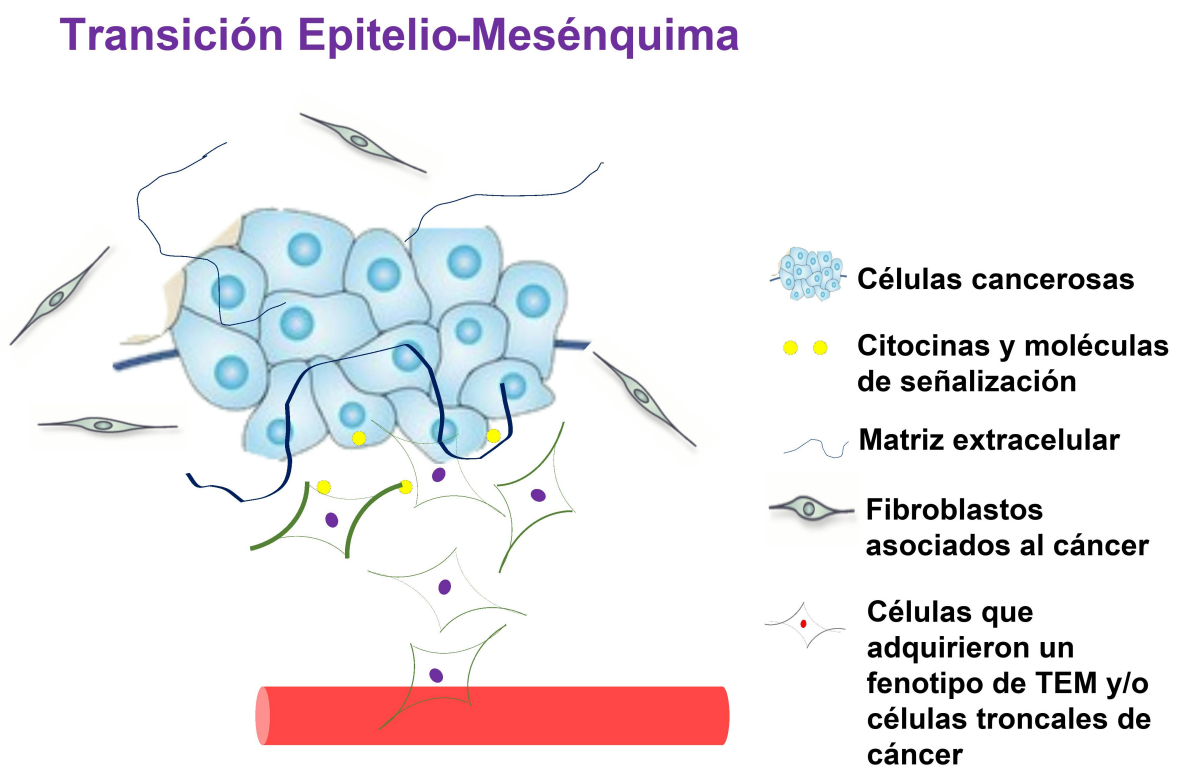


Figura 2: Mecanismo de metástasis: La transición epitelio-mesénquima es uno de los mecanismos generales de la progresión del tumor primario hacia la metástasis. El microambiente tumoral y las señales que reciben las células del cáncer en un tumor sólido favorecen su movilidad.

Células viajeras del cáncer

Una vez rompiendo la matriz extracelular y accediendo al torrente sanguíneo (un mecanismo conocido como intravasación), las células son nombradas células viajeras de cáncer ya que son llevadas a través de las venas por el flujo sanguíneo. En esta etapa, las pocas células que han accedido al torrente sanguíneo son resistentes a fármacos antineoplásicos, pero también a las células del sistema inmune. Sin embargo, el cáncer ha desarrollado mecanismos para evadir esta respuesta inmune como la expresión de antígenos débilmente inmunogénicos o la secreción de citocinas inmunosupresoras entre muchas otras estrategias. En esta etapa, la enfermedad ya no es tan manejable, el cáncer se ha diseminado al torrente sanguíneo como una raíz que se ha internado en los confines de la tierra; podemos cortar la parte superficial de la raíz, pero en realidad no sabemos hasta donde está metida dentro de la tierra. Y lo peor aún, no sabemos si pudiera nuevamente brotar.

Colonización en nuevos tejidos y muerte

Una vez en el torrente sanguíneo, las células cancerosas empoderadas, con mecanismos de evasión de la respuesta inmune, resistentes a las terapias antineoplásicas (quimioterapia), resistentes a la falta de oxígeno, nutrientes, radiación, con fenotipo troncal y dispersándose en lo más recóndito de las venas, son prácticamente indestructibles. La presencia de estas células en nódulos linfáticos es casi la sentencia final de su destino. Lo único que les queda es colonizar un nuevo sitio, es decir, si el tumor maligno primario inició digamos en la próstata, llegar a otro sitio distante como pulmón o huesos es su siguiente meta y esto es conocido como metástasis distante. Para hacerlo utilizan un mecanismo conocido como colonización. Para colonizar un nuevo sitio, las células viajeras del cáncer pueden: a) encontrar un intersticio entre los tejidos, b) encontrar una señal en órganos o tejidos cuyo origen embrionario es similar al que dio lugar al cáncer que ya está diseminado, o bien, c) otro mecanismo hasta ahora desconocido. Cualquiera que sea el caso, las células viajeras del cáncer detienen su agitado movimiento entre este nuevo órgano o tejido que ya encontraron, comienzan nuevamente a secretar proteasas de matriz, pero en esta ocasión lo hacen para dejar el torrente sanguíneo e incorporarse al nuevo tejido. Este es el proceso de colonización y para lograrlo requieren la expresión de muchas proteínas orquestadas por un factor conocido como NOTCH. Una vez incorporadas a este nuevo tejido, las células otra vez comienzan a proliferar, pero de forma descomunal, a un ritmo vertiginoso, de manera tal que se forma un nuevo tumor en cuestión de poco tiempo y esto ocasiona constricción en los tejidos y órganos, pérdida de su funcionamiento normal y la consecuente muerte de todo el organismo.

Notas finales

La metástasis es un proceso intrínseco de las células cancerosas, pero con señales claras y precisas que desafortunadamente no se han utilizado para el desarrollo de terapias dirigidas. En la actualidad existen compuestos provenientes de plantas, no tóxicos pues se consumen en la dieta habitual, que pueden tener la capacidad de bloquear las señales que le indican al cáncer iniciar la metástasis. Estas estrategias y otras experimentales deberán ser

incorporadas en los esquemas de tratamiento actuales para inhibir los procesos pre-metastásicos y brindar una mejor calidad de vida al paciente.

Referencias

[1] Chaffer, C.L. y R.A. Weinberg. (2011). "A perspective on cancer cell metastasis", en *Science*, Vol. 331, núm. 6024, pp. 1559–1564.

[2] Fares, J., *et al.* (2020). "Molecular principles of metastasis: a hallmark of cancer revisited", en *Signal transduction and targeted therapy*, vol. 5, núm. 1, p28.

[3] Gallardo-Pérez, J.C., *et al.* (2014). "GPI/AMF inhibition blocks the development of the metastatic phenotype of mature multi-cellular tumor spheroids", en *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 1843, núm. 6, pp. 1043–1053.

[4] Gallardo-Pérez, J.C., M. Espinosa-Castilla, J. Meléndez-Zajgla y V. Maldonado-Lagunas. (2006). "Esferoides tumorales multicelulares en la evaluación de estrategias terapéuticas anticancerosas", en *Revista de Educación Bioquímica*, vol. 25, núm. 4, pp. 101-107.

[5] Guerra-González, A., *et al.* (2020). "Metástasis: un hito para el conocimiento, un reto para la ciencia", en *Revista Cubana de Medicina*, vol. 59, núm 1, p. e1167.

[6] Salas-Herrera, I. y L.C. Huertas-Gabert. 2004. "Dolor óseo inducido por cáncer metastásico: fisiopatología y tratamiento", en *Acta Médica Costarricense*, vol. 46, núm. 1, pp. 07-12.

Recuadros de texto sugeridos

Uniones intercelulares. Incluyen a aquellas proteínas que mantienen unidos a los tejidos y al cáncer primario, recién formado: E-cadherina, conexinas, desmosomas.

Hipoxia. Una condición dentro del tumor en donde el oxígeno disminuye hasta 1% debido al alejamiento de los vasos sanguíneos por el crecimiento tumoral (a la altura de la Ciudad de México el oxígeno atmosférico es entre 20 y 21%).

Transción epitelio-mesénquima. Es un mecanismo de metástasis en el cuál las células cancerosas se desprenden de un tumor sólido, adquieren movilidad y colonizan otro tejido.

Proteínas de metastasis. Incluyen Snail, Slug, N-cadherina, vimentina, fibronectina, metaloproteasas de matriz, NOTCH.

Fibroblastos asociados al cáncer. Son células normales, adyacentes al tumor maligno, las cuales nutren al cáncer.

Moléculas de señalización. Incluyen citocinas, quimiocinas, factores de crecimiento que dan la señal para que la célula cancerosa comience a hacer metástasis.

Lactancia Materna : ¿Podría ser un escudo protector contra la esclerosis múltiple?



M.D. Alejandro Hernandez Zarate
Laboratorio de Reprogramación Celular, Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía
Facultad Mexicana de Medicina, Universidad La Salle

Dra. Graciela Ordoñez
Unidad de Neuroinmunología y Neuro-oncología, Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía

M.D. Julio Sotelo
Laboratorio de Neurología Experimental, Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía

Dra. Roxana Magaña Maldonado
Laboratorio de Reprogramación Celular, Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía

Imagen creada con IA generativa - Gemini Google, editada en Canva.com

Abstract
Breastfeeding provides essential nutrients and immune protection to newborns against chronic diseases and infections. Breastfeeding for as long as possible promotes a more balanced immune system and healthier brain maturation. Evidence suggests that breastfeeding for at least 4 months may lower the risk of developing Multiple Sclerosis (MS) later in life. Promoting breastfeeding as a public health intervention is important and could contribute to reducing the incidence of diseases, including MS, in future generations. Continued research is needed to clarify the molecular mechanism underlying this potential neuroprotective effect.

Keywords Multiple sclerosis, breastfeeding, neurodevelopment, immunity.

Resumen
La lactancia materna es fundamental para brindar nutrientes esenciales y conferir protección al recién nacido contra enfermedades crónicas e infecciones. Amamantar el mayor tiempo posible favorece un sistema inmune más equilibrado y un cerebro que madura mejor. Existe evidencia que la lactancia de al menos 4 meses se ha asociado con una menor probabilidad de desarrollar Esclerosis Múltiple (EM). Por ello, es de gran importancia promoverla como una intervención de salud pública que podría contribuir a reducir la incidencia de enfermedades entre ellas, la EM en futuras generaciones. Es necesario continuar investigando para comprender mejor los mecanismos moleculares que subyacen a este potencial efecto neuroprotector.

Palabras clave: Esclerosis múltiple, lactancia materna, neurodesarrollo, inmunidad.

¿Qué es la esclerosis múltiple?

La EM es una enfermedad donde las defensas del cuerpo atacan la mielina del propio enfermo, la capa aislante de los nervios en el cerebro y médula espinal. Origina problemas de visión, equilibrio, fuerza muscular y memoria. La genética es un factor familiar de predisposición; sin embargo, también influyen factores ambientales tempranos como infecciones por herpes virus, tabaquismo, obesidad, niveles de vitamina D, exposición a la luz solar y duración de la lactancia (Holz *et al.,* 2022). Todos estos elementos interactúan al modular el sistema inmune y contribuir al desarrollo de EM (Figura 1).

La EM se inicia con la disrupción de la barrera hematoencefálica (BHE), permitiendo la entrada de células inmunes al sistema nervioso central (SNC). Una vez dentro: (1) La BHE se vuelve permeable y deja pasar leucocitos y proteínas. (2a) Los linfocitos o células T interactúan con las células B. (2b) Las células T también interactúan con la microglía en el tejido cerebral, como resultado, (3) se liberan citocinas proinflamatorias y anticuerpos. (4) Este proceso provoca la pérdida de la mielina producida por los oligodendrocitos que es la capa protectora que envuelve a los axones, este proceso llamado desmielinización, afecta la comunicación neuronal. Imagen creada y modificada de BioRedender.com

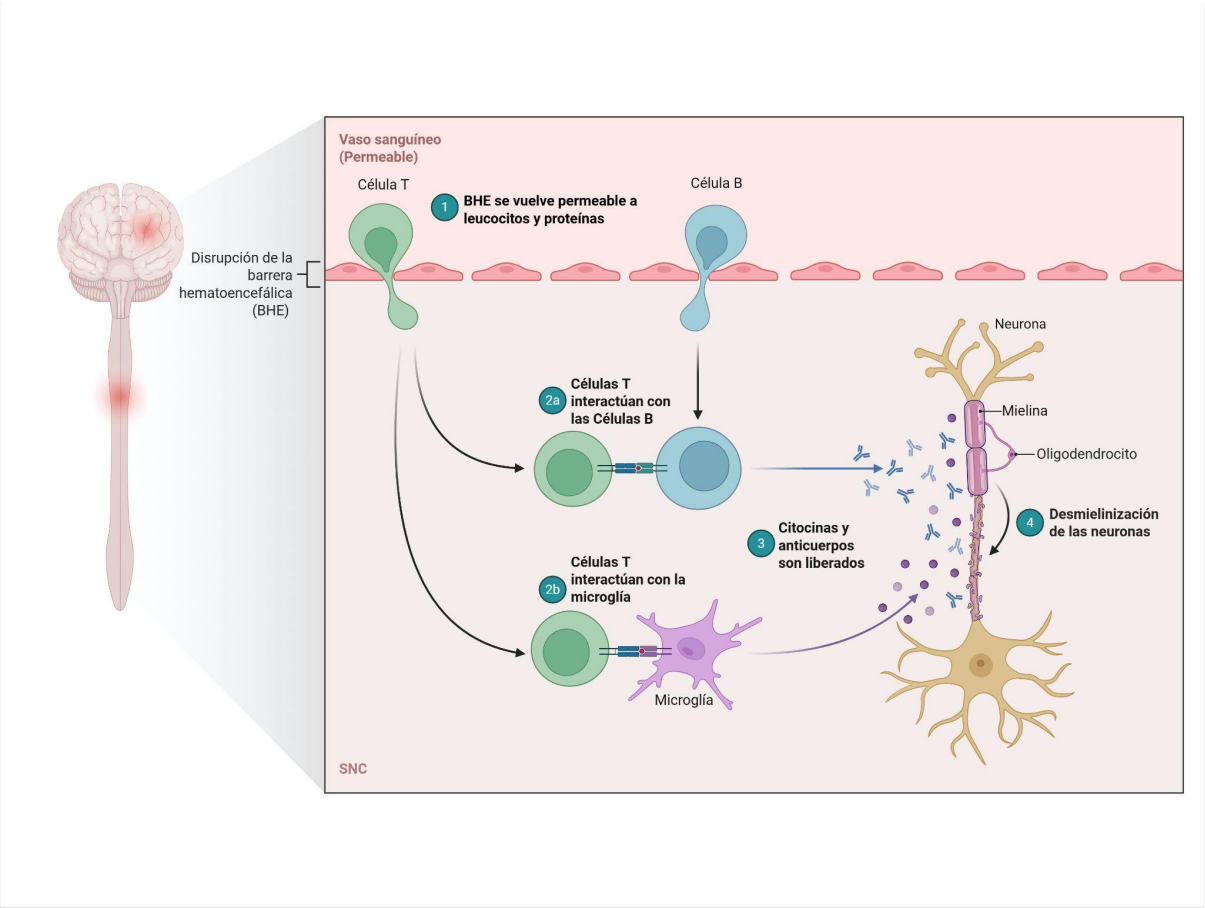


Figura 1: Respuesta inmunológica en Esclerosis Múltiple.

¿Por qué la lactancia podría proteger?

La leche materna no es solo alimento: es un "cóctel inteligente" de defensas (inmunoglobulinas, y citocinas como TGF-β, entre otras), células inmunes, grasas esenciales, vitaminas, oligosacáridos y microbios "buenos" que ayudan a:

- Entrenar el sistema inmune del bebé para que responda sin "sobre reaccionar".
- Fortalecer la barrera intestinal y hematoencefálica, reduciendo la entrada de agentes que podrían dañar el SNC.
- Favorecer el desarrollo cerebral (mielinización y crecimiento de neuronas) gracias a grasas, colesterol, taurina y factores de crecimiento.
- Modular el eje intestino-cerebro, una autopista de señales que conecta microbiota, defensas y cerebro (Ballard y Morrow, 2013) (Sweeney *et al.*, 2016) (Figura 2).

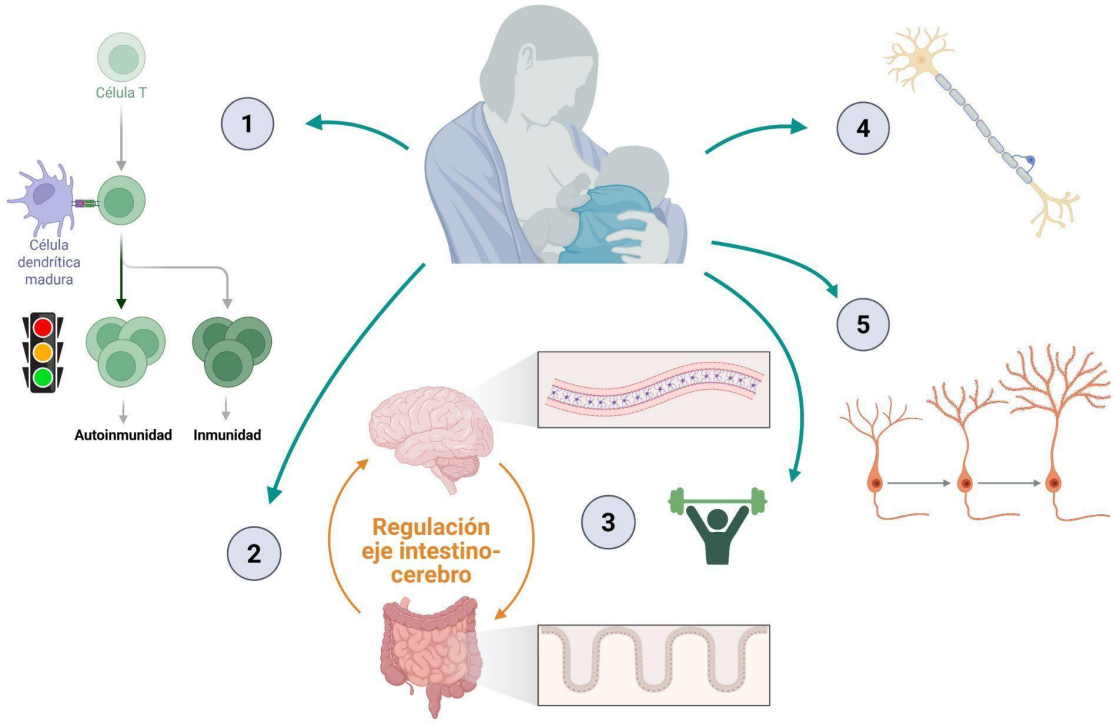


Figura 2: Mecanismos potenciales mediante los cuales la lactancia materna podría proteger en el desarrollo de Esclerosis Múltiple.

(1) Modulación inmunológica y prevención de autoinmunidad: los componentes de la leche materna influyen en la maduración de células dendríticas y linfocitos T, promoviendo tolerancia inmunológica y reduciendo así la probabilidad de respuestas autoinmunes. (2) Regulación del eje intestino-cerebro: los bioactivos de la leche fortalecen la barrera intestinal, modulan la microbiota, facilitan la comunicación entre intestino y SNC. (3) Fortalecimiento de barreras protectoras: los factores bioactivos de la leche materna contribuyen a mantener la integridad de la barrera intestinal y la BHE, reduciendo la entrada de agentes dañinos al organismo y al SNC. (4) Mantenimiento de la mielina: factores nutricionales y neurotróficos presentes en la leche ayudan a preservar la integridad de la vaina de mielina que recubre a los axones. (5) Crecimiento neuronal: promueve la maduración del cerebro y crecimiento de neuritas.

¿La lactancia protege contra Esclerosis Múltiple?

Varios estudios poblacionales en México, Europa y Norteamérica han encontrado que los niños amamantados por un largo periodo presentan menor riesgo para desarrollar EM en la edad adulta, este

beneficio se inicia cuando la lactancia dura ≥ 4 meses, y es mayor con 6–12 meses (Conradi *et al.,* 2013, Ragnedda *et al.,* 2015; Brenton *et al.,* 2017; Hedström *et al.,* 2020).

La ausencia de lactancia se ha vinculado con mayor riesgo de desarrollar EM, el tema es controversial, hay estudios que no presentan asociación, mientras que otros muestran un efecto protector de pequeño a moderado (Holz *et al.,* 2022). En algunos análisis, el beneficio se presenta con más claridad en varones y en portadores de genes de riesgo como HLA-DRB1*15:01 (Hedström *et al.,* 2020).

Es importante saber que no es una "vacuna" contra EM, pero amamantar el tiempo suficiente inclina la balanza a favor de un sistema inmune más equilibrado y un cerebro que madura mejor.

¿Cuánto tiempo de lactancia hace la diferencia?

La duración de la lactancia materna es un factor crucial que influye significativamente en la salud y desarrollo tanto del bebé como de la madre. Si bien cada gota cuenta y cualquier tiempo de lactancia aporta beneficios, existen recomendaciones de organismos internacionales que establecen periodos óptimos para maximizar estas ventajas.

Se considera que una lactancia mínima de cuatro meses es meta razonable. Durante este periodo, el bebé recibe nutrientes esenciales, anticuerpos que fortalecen su sistema inmunológico y el contacto piel con piel que promueve el vínculo afectivo. Además de ser un buen comienzo, la evidencia sugiere que extender la lactancia más allá de este punto puede ofrecer beneficios aún mayores.

El objetivo ideal, y la recomendación de organizaciones de salud a nivel mundial como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y Fondo de las Naciones Unidad para la infancia (UNICEF, por sus siglas en inglés), es lactancia materna exclusiva durante los primeros seis meses de vida. Esto significa que el bebé no consuma ningún otro alimento o bebida, la leche materna proporciona toda la hidratación y nutrientes que necesita (OMS, 2023).

Después de seis meses, se aconseja continuar con lactancia materna junto con la introducción de alimentos complementarios adecuados y seguros hasta los dos años o más.

Cualquier tiempo suma; más tiempo protege más.

Preguntas frecuentes

1) ¿La fórmula infantil "sustituye" la leche materna? No, la fórmula nutre, pero no replica el paquete completo de defensas, microbios, oligosacáridos y factores inmunes/neurotróficos de la leche humana (Figura 3).

2) ¿Y si no puedo amamantar (o no el tiempo ideal)? No es "todo o nada". Cualquier cantidad es valiosa. Busca apoyo con asesoría de lactancia, extracción y bancos de leche. La crianza saludable incluye muchos otros pilares (vacunación, nutrición, sueño, apego, juego, sol, evitar humo de tabaco, entre otros).

3) ¿Amamantar también beneficia a la madre? Sí, se asocia con menor riesgo de cáncer de mama, ovario, diabetes tipo 2 y depresión posparto, entre otros beneficios.

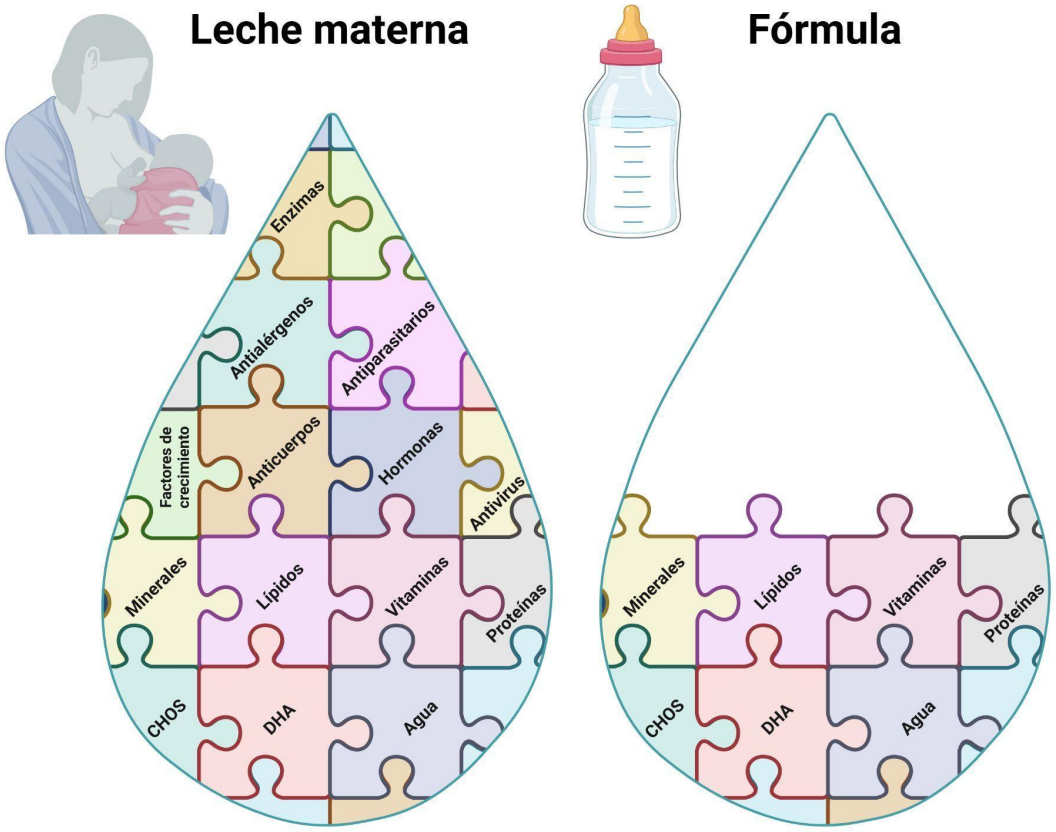


Figura 3: Diferencias en la composición de la leche materna y la fórmula infantil.

La leche materna es un fluido biológico complejo que no solo aporta nutrientes básicos como agua, proteínas, lípidos, carbohidratos, vitaminas y minerales, sino también factores inmunológicos y bioactivos únicos: anticuerpos, enzimas, hormonas, factores de crecimiento, antioxidantes, antivirales y antiparasitarios. Estos componentes contribuyen al desarrollo del sistema inmune, maduración cerebral y protección contra infecciones. En contraste, la fórmula infantil contiene principalmente nutrientes esenciales (agua, proteínas, grasas, carbohidratos, vitaminas y minerales), pero carece de la mayoría de los elementos inmunológicos y neuroprotectores presentes en la leche materna.

Conclusión

Amamantar durante al menos 4 meses (idealmente de 6 a 12 meses) se ha asociado con una menor probabilidad de desarrollar EM, según la evidencia actual. Aunque no es el único factor, es una de las decisiones tempranas con mayor impacto a largo plazo. Este hallazgo resalta la importancia de promover y apoyar la lactancia materna como una intervención de salud pública que podría contribuir a reducir la incidencia de EM en futuras generaciones. Es fundamental seguir investigando para comprender mejor los mecanismos específicos por los cuales la lactancia materna ejerce este efecto protector, así como para identificar otros factores ambientales y genéticos que

interactúan en la compleja etiología de EM.

Este artículo de divulgación e información social forma parte de un proyecto financiado por SECIHTI, clave CBF-2025-I-3117

Referencias

[1] Ballard, O. y Morrow, A.L., *Human milk composition: nutrients and bioactive factors*, Pediatr. Clin. North Am., 60[1], pp.49–74, 2013.

[2] Brenton, J.N., Engel, C.E., Sohn, M.-W. y Goldman, M.D., *Breastfeeding during infancy is associated with a lower future risk of pediatric multiple sclerosis*, Pediatr. Neurol., 77, pp.67–72, 2017.

[3] Conradi, S., Malzahn, U., Paul, F., Quill, S., Harms, L., Then Bergh, F. y cols., *Breastfeeding is associated with lower risk for multiple sclerosis*, Mult. Scler., 19, pp.553–558, 2013.

[4] Hedström, A.K., Adams, C., Shao, X., Schaefer, C., Olsson, T., Barcellos, L.F. y Alfredsson, L., *Breastfeeding is associated with reduced risk of multiple sclerosis in males, predominantly among* HLA-DRB115:01 carriers*, Mult. Scler. J. Exp. Transl. Clin., 6, 2055217320928101, 2020.

[5] Holz, A., Riefflin, M., Heesen, C., Riemann-Lorenz, K. y Obi, N., *Breastfeeding and risk of multiple sclerosis: a systematic review and meta-analysis of observational studies*, Neuroepidemiology, 56, pp.391–401, 2022.

[6] Ragnedda, G., Leoni, S., Parpinel, M., Casetta, I., Riise, T., Myhr, K.-M., Wolfson, C. y Pugliatti, M., *Reduced duration of breastfeeding is associated with a higher risk of multiple sclerosis in both Italian and Norwegian adult males: the EnvIMS study*, J. Neurol., 262, pp.1271–1277, 2015.

[7] Sweeney, M.D., Ayyadurai, S. y Zlokovic, B.V., *Pericytes of the neurovascular unit: key functions and signaling pathways*, Nat. Neurosci., 19, pp.771–783, 2016.

[8] Organización Mundial de la Salud (OMS), *Recomendaciones sobre la lactancia materna exclusiva durante los primeros seis meses de vida*, OMS, Ginebra, 2023.

DEL DESCUBRIMIENTO DE LA MORFINA A LA SÍNTESIS DEL FENTANILO



D. en C. María Elena Sánchez Mendoza

D. en C. Yaraset López Lorenzo

D. en C. Jesús Arrieta

Escuela Superior de Medicina, Instituto Politécnico Nacional

Imagen creada con IA generativa — OpenAI / ChatGPT

Abstract
The discovery of morphine from *Papaver somniferum* represented a major contribution to the treatment of severe pain and prompted the development of other medications, both semi-synthetic and synthetic, that are capable of effectively controlling pain. However, its addictive potential has generated a major public health crisis. Such is the case with fentanyl, whose growing demand has led to its illegal synthesis, along with various analogues that cause an alarming number of deaths in overdoses. To address this problem, government intervention is not enough; active collaboration across multiple sectors of society is essential to regulate the use of painkillers and ensure that their use is limited to treatments under strict medical supervision.

Keywords: painkillers, fentanyl, morphine, opium.

Resumen
El descubrimiento de la morfina a partir de *Papaver somniferum* representó un gran aporte en la terapéutica del dolor severo e impulsó el desarrollo de otros medicamentos, tanto semisintéticos como sintéticos, que son capaces de controlar el dolor de forma efectiva. Sin embargo, su potencial adictivo ha generado una crisis de salud pública de gran magnitud. Tal es el caso del fentanilo, cuya creciente demanda ha llevado a que se sintetice de manera ilegal, junto con diversos productos análogos que llegan a causar un alarmante número de muertes en caso de sobredosis. Para enfrentar esta problemática, no basta con la intervención gubernamental, es indispensable la colaboración activa de múltiples sectores de la sociedad a fin de regular el uso de los analgésicos y garantizar que su consumo se limite a tratamientos bajo estricta supervisión médica.

Palabras clave: analgésicos, fentanilo, morfina, opio.

Introducción

Cuando te toca vivir la desafortunada experiencia de tener un familiar en el servicio de urgencias de un hospital público y al dirigirte al lugar donde se encuentra, es imposible no mirar a los enfermos de las camas de alrededor, si bien no puedes saber que enfermedad los ha llevado al hospital, lo más probable es que quizá todos experimentaron dolor en alguna parte de su cuerpo y por ello acudieron al hospital en busca de un diagnóstico y tratamiento, pero ¿qué es el dolor? En este artículo veremos su definición, y algunos sucesos importantes que permitieron el descubrimiento del analgésico natural morfina y como a partir de ella se impulsó el desarrollo de diversos medicamentos hasta llegar al fentanilo y compuestos análogos, cuya producción ilegal se ve favorecida ya que parten de precursores totalmente sintéticos y desafortunadamente su consumo inadecuado los ha convertido en un grave problema de salud.

El dolor

El concepto de dolor ha cambiado en el transcurso de la historia de lo místico a lo científico. Las antiguas civilizaciones consideraban el dolor como algo sobrenatural y lo relacionaban con demonios y espíritus malignos dentro del cuerpo (Vincenot *et al.,* 2025). Con el paso de los años, los conocimientos fueron evolucionando hasta llegar a 1978, año en el que la Asociación Internacional para el Estudio del Dolor (IASP, por sus siglas en inglés) elaboró

una definición de dolor que ha tenido ligeras modificaciones y en el 2020, la versión actualizada lo definió como: "una experiencia sensorial y emocional desagradable asociada o similar a la asociada a una lesión tisular real o potencial" (Raja *et al.,* 2020). De modo que el dolor es un síntoma, una señal de advertencia que nos indica que existe una enfermedad o un daño que debe ser atendido de forma inmediata y nunca debemos ignorarlo.

Clasificación del dolor

El dolor se puede clasificar en función de diversos criterios, uno de ellos es conforme a su duración, por lo que puede ser agudo o crónico. El dolor agudo aparece súbitamente y puede ser consecuencia de lesiones traumáticas, daño tisular, infarto, alguna cirugía o procesos inflamatorios, entre otros, y generalmente disminuye cuando se trata o comienza a sanar en cuestión de días o semanas, aunque puede persistir hasta 3 meses. Mientras que el dolor crónico a menudo dura más de 6 meses y puede ser resultado de una enfermedad crónica o una afección no tratada (Ellison, 2017).

Descubrimiento de la morfina

El descubrimiento de la morfina representó una enorme aportación en el tratamiento del dolor, esta se obtiene de la amapola cuyo nombre científico es *Papaver somniferum* y su uso se remonta al año 3000 a.C., periodo en que los sumerios la cultivaban en Mesopotamia y del fruto (cápsula) de la amapola extraían el opio (Calixto *et al.,* 2000). El opio contiene diferentes compuestos responsables de sus propiedades farmacológicas (Presley y Lindsley, 2018), sin embargo, en este artículo solo se revisará la morfina. El conocimiento de la planta se extendió a otras culturas como los asirios, los egipcios, los griegos y los romanos (Presley y Lindsley, 2018). En la Edad Media el médico y filósofo árabe conocido como Avicena escribió el libro llamado "Canon de Medicina", que incluía los conocimientos adquiridos por médicos griegos, indios, persas y romanos (Pérez *et al.,* 2018) y tiene un capítulo dedicado al "afyum" (nombre que le daban al opio) en el que se describían varios de sus efectos farmacológicos (Presley y Lindsley, 2018). En Europa se popularizó el uso del opio gracias a Paracelso, un médico y alquimista que aplicó el nombre "láudano" a varias medicinas que contenían opio (Presley y Lindsley, 2018). Otro importante acontecimiento en la historia del opio fue cuando el médico británico Thomas Sydenham elaboró su versión del láudano como tintura, que generalmente estaba disuelta en vino o licor (Devereaux *et al.,* 2018).

A principios del siglo XIX se tenía un enorme interés por identificar el principal componente del opio, y un asistente farmacéutico alemán llamado Friedrich Wilhelm Adam Sertürner logró aislar dos compuestos del opio, uno de ellos fue el actualmente conocido como ácido mecónico y al otro compuesto lo nombró "principium somniferum". Sertürner publicó sus hallazgos en 1806, desafortunadamente sus descubrimientos pasaron desapercibidos, sin embargo, continuó experimentando con el "principium somniferum" y confirmó sus efectos narcóticos al ingerirlo el mismo junto con tres jóvenes, por lo que su trabajo constituyó la primera evidencia de que la morfina era un componente psicoactivo del opio. Sertürner republicó sus hallazgos en 1817 y renombró su "principium somniferum" como "morphium", en honor a Morfeo, el dios griego de

los sueños. Esta vez la publicación de Sertürner llamó la atención del reconocido químico francés Joseph Louis Gay Lussac, quien cambió el nombre "morphium" a morfina, que es el nombre con el que se le conoce hasta hoy en día (Presley y Lindsley, 2018; Devereaux *et al.,* 2018).

Menos de 20 años después del descubrimiento y aislamiento de la morfina por Sertürner, (Figura 1) un farmacéutico llamado Heinrich Emmanuel Merck logró comercializar la sustancia en 1820 (Devereaux *et al.,* 2018).

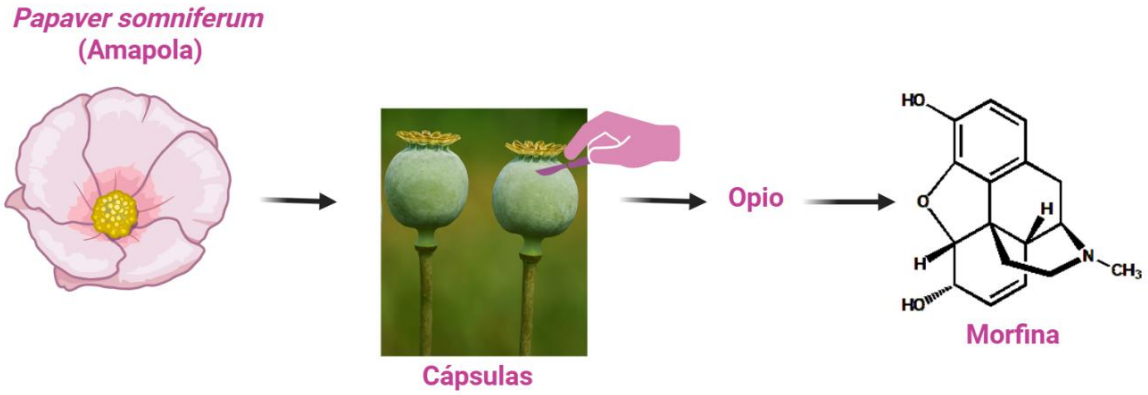


Figura 1: Descubrimiento de la morfina.

Usos y efectos adversos de la morfina

En 1850 la morfina comenzó a utilizarse para el dolor postoperatorio y crónico, en procedimientos quirúrgicos menores y como adyuvante de anestésicos generales (Calixto *et al.,* 2000). A finales de la década de 1860 se promovió la administración hipodérmica de morfina que permitía una dosificación más precisa (Devereaux *et al.,* 2018). En la actualidad se sabe que el consumo crónico de morfina ocasiona graves efectos adversos como la dependencia, disfunción sexual, mayor riesgo de infarto y depresión respiratoria, entre otras (Johnson *et al.,* 2025).

Síntesis de opioides semisintéticos y sintéticos

A partir del opio se diseñaron diversos opioides semisintéticos como la heroína y la oxicodona (Figura 2). La heroína es un derivado diacetilado de la morfina que fue sintetizado por la compañía Bayer en 1874 y que resultó ser más potente que la morfina, mientras que la oxicodona fue sintetizada en 1916 en Alemania, a partir de la tebaína que es otro alcaloide presente en el opio. Al principio el uso de esta última era muy popular, sin embargo, tras varios años identificaron que conlleva graves riesgos para la salud además de dependencia (Marie y Noble, 2023). Años más tarde, unos científicos descubrieron que la meperidina (Figura 3) poseía propiedades analgésicas similares a las de la morfina, aunque era un compuesto químico que estructuralmente no estaba relacionado con los opiáceos (Suzuki y El-Haddad, 2017). La meperidina se sintetizó por primera vez en 1939, y pronto se convirtió en uno de los analgésicos más utilizados para el tratamiento del dolor moderado a intenso (Latta, 2002), pero actualmente se recomienda que su uso se limite

únicamente a pacientes alérgicos o intolerantes a todos los demás opioides (Gourlay, 2005).

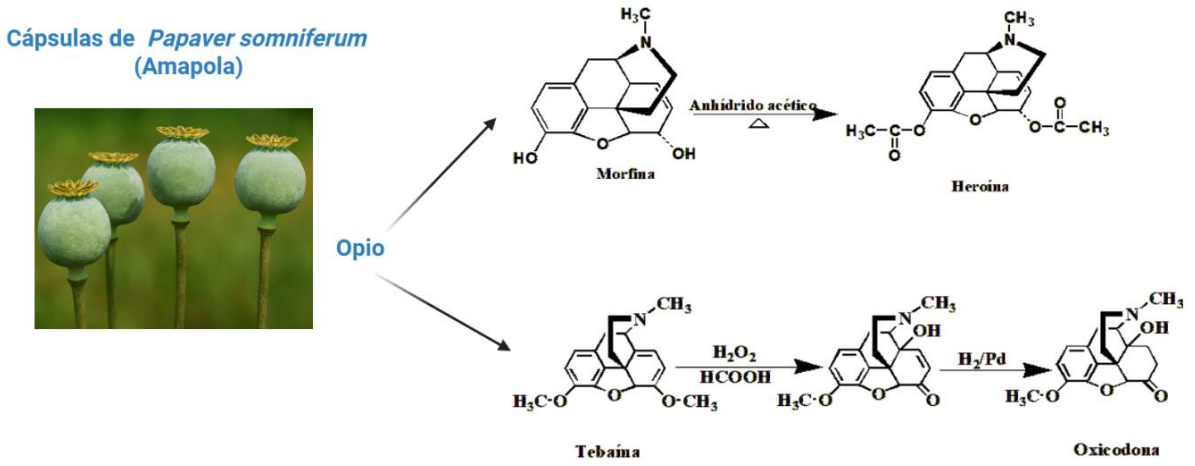


Figura 2: Algunos opioides semisintéticos.

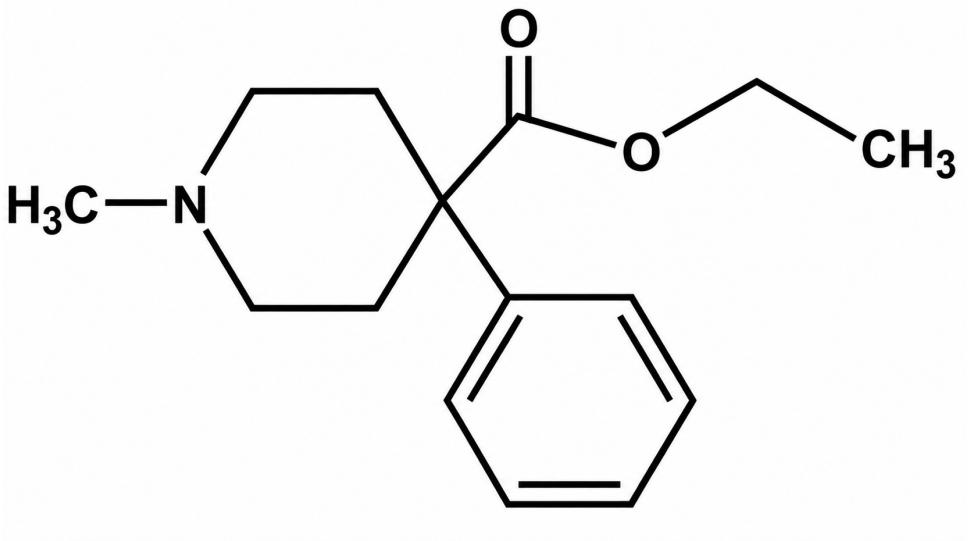


Figura 3: Estructura química de la meperidina.

Síntesis de fentanilo

En 1953 en Bélgica, el Dr. Paul Janssen estaba interesado en encontrar nuevas moléculas analgésicas que fueran más potentes y eficaces que la morfina o la meperidina (Stanley, 2014), pero con menos efectos secundarios. Entre 1953 y 1957, el Dr. Janssen y su equipo de investigadores llevaron a cabo la síntesis de docenas de nuevos analgésicos y en agosto de 1957 sintetizaron fenoperidina, que es un compuesto totalmente sintético. La fenoperidina resultó ser más potente que la morfina y la meperidina, por lo que su equipo continuó trabajando en la síntesis de moléculas relacionadas y en 1960 sintetizaron el fentanilo (Figura 4) por primera vez. El fentanilo resultó ser más potente que la fenoperidina (más de 10 veces) y que la morfina (100 a 200 veces) en la mayoría de los modelos animales (Stanley, 2014).

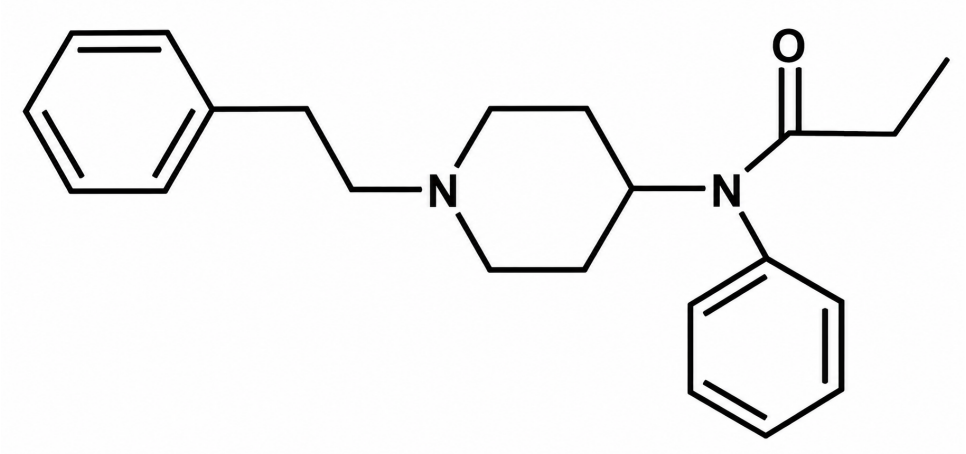


Figura 4: Estructura química del fentanilo.

Aplicaciones farmacológicas del fentanilo

En 1963 el fentanilo se registró en Europa y se empezó a utilizar como analgésico y en anestesia, a menudo en combinación con otros fármacos. Cinco años después empezó su comercialización en Estados Unidos y de igual forma era usado como anestésico intravenoso (Kuczyńska *et al.,* 2018), pero su uso estaba restringido y los médicos solo podían obtenerlo en combinación con el fármaco droperidol. Años después, el fentanilo ya se encontraba disponible de manera individual (Suzuki y El-Haddad, 2017). Posteriormente, los médicos se percataron de que cuando se administraba en dosis altas en cirugías cardiacas tenía ventajas sobre la morfina, lo que derivó en un incremento en sus ventas, que se multiplicaron cuando el fármaco dejó de estar patentado. Numerosas empresas comenzaron a desarrollar y a vender diferentes formas farmacéuticas de fentanilo como parches, soluciones inyectables, aerosoles nasales, comprimidos bucales y sublinguales (Figura 5), entre otros (Kuczyńska *et al.,* 2018; Stanley, 2014).

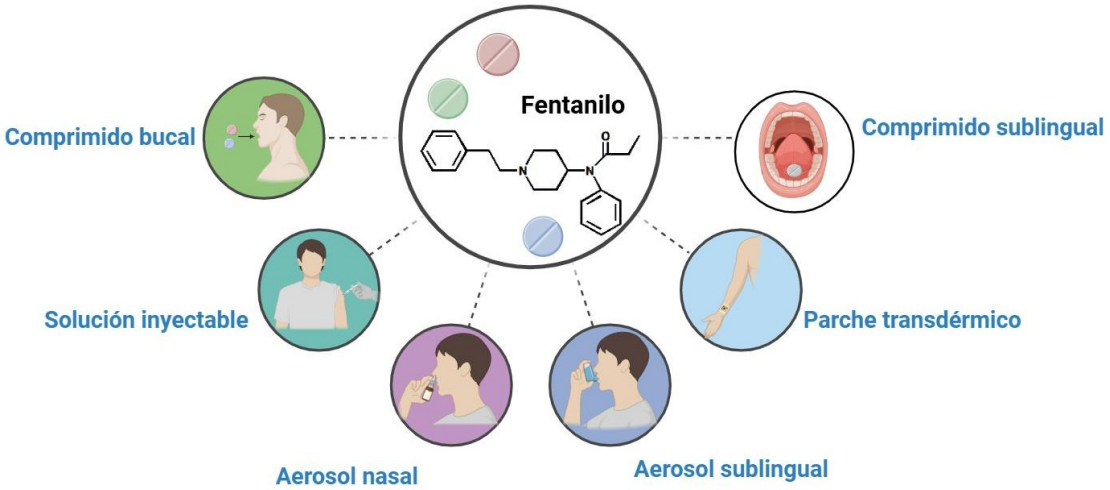


Figura 5: Formas farmacéuticas más comunes del fentanilo.

Análogos de fentanilo farmacéutico y síntesis de fentanilos no farmacéuticos

Muy pronto la producción de fentanilo resultó más conveniente que la obtención de morfina, ya que solo depende de precursores sintéticos (Suzuki y El-Haddad, 2017). Lo que condujo a la síntesis de varios análogos químicos del fentanilo. Los análogos son compuestos en los que se realizan ligeras modificaciones en su estructura, pero preservan o potencian sus efectos farmacológicos. Algunos de esos compuestos fueron registrados para ser utilizados en humanos (alfentanilo, remifentanilo y sufentanilo) y otros en animales (carfentanilo y tiofentanilo) (Kuczyńska *et al.,* 2018; Suzuki y El-Haddad, 2017). Dada la alta demanda de fentanilo, se empezaron a sintetizar de manera clandestina análogos, y estos análogos junto con el fentanilo que se fabrican de manera ilícita se denominan fentanilos no farmacéuticos (Suzuki y El-Haddad, 2017). A principios de la década de 1990 se habían identificado en el mercado negro diez fentanilos no farmacéuticos, lo cual es preocupante ya que algunos llegan a ser más potentes que el fentanilo y en numerosos casos han sido responsables de provocar muerte por sobredosis (Suzuki y El-Haddad, 2017).

Efectos por sobredosis de fentanilo y antídoto en caso de sobredosis

El fentanilo produce numerosos efectos sobre el sistema nervioso central como relajación, euforia, sedación, somnolencia, náuseas, vómitos, rigidez muscular, dependencia, y depresión respiratoria (CONASAMA, 2024), por lo que la sobredosis puede causar diversas complicaciones médicas que pueden provocar la muerte (Suzuki y El-Haddad, 2017). Un antídoto eficaz contra la sobredosis es la naloxona. Tras la administración de naloxona, la respuesta puede observarse en dos minutos si se administra por vía intravenosa, y en 10 minutos si se administra por vía intranasal o intramuscular (Suzuki y El-Haddad, 2017).

Grave problema de salud

El consumo de fentanilos no farmacéuticos se ha convertido en un grave problema de salud principalmente en Estados Unidos, Canadá, y en los países europeos (Suzuki y El-Haddad, 2017). En Estados Unidos durante el 2023, se estimó que aproximadamente 7 de cada 10 muertes por sobredosis de drogas se debieron al consumo de fentanilos no farmacéuticos (Tanz *et al.,* 2024). Desde el 2013, los fentanilos no farmacéuticos ingresaron al suministro de drogas ilegales en Estados Unidos, como adulterantes o sustitutos de la heroína, y ahora han remplazado a la heroína como el opioide dominante en ese país. Además de que se está consumiendo carfentanilo, que es un producto de fentanilo destinado al uso veterinario para la inmovilización de animales salvajes (Suzuki y El-Haddad, 2017) y su consumo de igual forma ha sido la causa de muerte por sobredosis (Tanz *et al.,* 2024).

Fentanilo en México

En México, el uso de fentanilo está regulado por la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) y había sido utilizado exclusivamente con fines medicinales, sin embargo, durante las últimas décadas la demanda de consumo en Estados Unidos ha tenido un enorme impacto en México, ya que dejó de ser un

país de paso de drogas (CONASAMA, 2024) a ser un país desde donde se procesan o se envían precursores para su síntesis a personas involucradas o no con cárteles de la droga (Kuczyńska *et al.,* 2018; Suzuki y El-Haddad, 2017). Asimismo, en México comenzó su consumo ilegal, principalmente en los estados de Baja California, Chihuahua, Sinaloa y Sonora. A partir de 2018 el número de casos ha crecido contándose en decenas hasta 2020 y en centenas desde 2021(CONASAMA, 2024). Algunos estudios en la frontera norte de México han evidenciado que los usuarios desconocían que consumían fentanilo, ellos indicaban el consumo de una sustancia llamada China White, o goma negra de heroína cuyo análisis demostró que varias de esas muestras contenían una combinación de heroína con fentanilo. A mediados de 2023, se comenzaron a monitorear las atenciones de urgencias relacionadas con la intoxicación por fentanilo, y de junio de 2023 a enero de 2024, los estados que reportaron casos fueron Baja California (7), Sinaloa (6), Quintana Roo (2), Sonora (2), Ciudad de México (1), Morelos (1), Jalisco (1), Oaxaca (1), y Tamaulipas (1). Respecto a las defunciones por fentanilo, hasta el momento no existe un monitoreo adecuado a nivel nacional (CONASAMA, 2024).

Conclusión

Durante años los analgésicos de origen natural y los sintéticos han demostrado ser importantes fármacos para el manejo del dolor, lamentablemente ha surgido un incremento en las muertes por sobredosis, por lo que es indispensable que exista una regulación estricta de su uso para garantizar que su consumo se limite a tratamientos bajo supervisión médica.

Literatura citada

[1] Calixto, J. B., Beirith, A., Ferreira, J., Santos, A. R., Filho, V. C., y Yunes, R. A., Naturally occurring antinociceptive substances from plants, *Phytother Res*, 14[6], pp. 401–418, 2000. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10960893/

[2] Devereaux, A. L., Mercer, S. L., y Cunningham, C. W., DARK Classics in Chemical Neuroscience: Morphine, *ACS Chem Neurosci*, 9[10], pp. 2395–2407, 2018. URL. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29757600/

[3] Ellison D. L., Physiology of Pain, *Crit Care Nurs Clin North Am*, 29[4], pp.397–406, 2017. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29107303/

[4] Gourlay G. K., Advances in opioid pharmacology, *Support Care Cancer*, 13[3], pp.153–159, 2005. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15611852/

[5] Johnson, B. W., Strand, N. H., Raynak, J. C., Jara, C., Habtegiorgis, K., Hand, B. A., Hong, S., y Maloney, J. A., Cannabinoids in Chronic Pain Management: A Review of the History, Efficacy, Applications, and Risks, *Biomedicines*, 13[3], pp. 530, 2025. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40149508/

[6] Kuczyńska, K., Grzonkowski, P., Kacprzak, Ł., y Zawilska, J. B., Abuse of fentanyl: An emerging problem to face, *Forensic Sci Int*, 289, pp. 207–214, 2018. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29902699/

[7] Latta, K. S., Ginsberg, B., y Barkin, R. L., Meperidine: a critical

review, *Am J Ther*, 9[1], pp. 53–68, 2002. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11782820/

[8] Marie, N., y Noble, F., Oxycodone, an opioid like the others?, *Front Psychiatry*, 14, 1229439, 2023. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38152360/

[9] Pérez J.J., Armenteros J.K., y Hernández de Oro L.M., Avicena, the doctors' prince. Life, Works and legacy for the contemporary medicine, *Revista Cubana de Medicina*, 57[1], pp.66-79, 2018. URL: https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Avicena%2C+the+doctors%E2%80%99+prince.+Life%2C+Works+and+legacy+for+the+contemporary+medicine&btnG=

[10] Presley, C. C., y Lindsley, C. W., DARK Classics in Chemical Neuroscience: Opium, a Historical Perspective, *ACS Chem Neurosci*, 9[10], pp. 2503–2518. 2018. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30247870/

[11] Raja, S. N., Carr, D. B., Cohen, M., Finnerup, N. B., Flor, H., Gibson, S., Keefe, F. J., Mogil, J. S., Ringkamp, M., Sluka, K. A., Song, X. J., Stevens, B., Sullivan, M. D., Tutelman, P. R., Ushida, T., y Vader, K., The revised International Association for the Study of Pain definition of pain: concepts, challenges, and compromises, *Pain*, 161[9], pp.1976–1982. 2020. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32694387/

[12] Stanley T.H., The fentanyl story, J. *Pain*, 15[12], pp.1215-1226. 2014. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=The+fentanyl+story

[13] Suzuki, J., y El-Haddad, S., A review: Fentanyl and non-pharmaceutical fentanyls, *Drug Alcohol Depend*, 171, pp.107–116. 2017. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28068563/

[14] Tanz LJ, Stewart A, Gladden RM, Ko JY, Owens L, y O'Donnell J., Detection of Illegally Manufactured Fentanyls and Carfentanil in Drug Overdose Deaths - United States, 2021-2024, *Morb Mortal Wkly Rep*, 73[48], pp.1099-1105. 2024. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39636782/

[15] Vincenot, M., Poisbeau, P., Morel-Ferland, N., Dumas, G., y Léonard, G., A 5000-year overview of the history of pain through ancient civilizations to modern pain theories, *Pain Rep*, 10[3], e1241. 2025. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40190783/

[16] CONASAMA. Comisión Nacional de Salud Mental y Adicciones. 2024. Informe de la demanda y oferta de fentanilo en México: generalidades y situación actual. URL: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/910633/Informe_Fentanilo_abril_2024.pdf. Consultadoel12deseptiembrede2025.

FE DE ERRATAS

Por medio de la presente se hace la siguiente aclaración y corrección respecto al contenido del **Número 146** de la revista, publicado en **junio de 2026.** En el artículo: **"Contaminación por Ozono en cinco sitios de la Zona Metropolitana del Valle de México":**

• **Página 66:** Se imprimió por error la **Tabla 2:** *"Resumen estadístico del promedio por año-mes y la contingencia ambiental por O3 declarada el 23 y 25 de mayo 2024 en el Valle de México",* duplicando la tabla que corresponde a la página 64.

• **Corrección:** En la **página 66** debe figurar la **Tabla 3:** *"Resumen ANOVA no paramétrico Kruskal-Wallis para detectar cambios en la mediana mensual de O3 en ppm entre sitios de muestreo de la ciudad de México y estado de México. Los sitios en diferentes casillas son distintos con nivel de significación mínimo de 99%".*

Mayo, 2024 (A)	1	2	3	4	5
Estaciones de	CAM	BJU	MON	PED	UAX
monitoreo/zona	Noroeste	Centro	Noreste	Suroeste	Sureste
Núm. de datos	466	624	539	533	625
Mediana	0.043	0.054	0.054	0.055	0.060
Mediana global 0.054ppm					
Muestreo en %	63	84	72	72	84

Mayo 20-31, 2024 (B)	1	2	3	4
Estaciones de	MON	BJU	UAX	PED
monitoreo/zona	Noreste	Centro	Sureste	Suroeste
Núm. de datos	183	181	229	176
Mediana	0.047	0.050	0.051	0.053
Mediana global 0.050ppm				
Muestreo en %	64	63	80	61



Imagen creada con IA generativa — OpenAI / ChatGPT



Imagen creada con IA generativa — OpenAI / ChatGPT