

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

Abril - Junio 2026

ISSN:2683-2607

No. 146

**EXPLORANDO EL VALOR DE LOS
PAISAJES BIOCULTURALES, UN
EJEMPLO EN LA ZONA MAZAHUA**

**CRISPR-CAS9 ENTRA EN ACCIÓN: LAS
TIJERAS MOLECULARES QUE
DESAFÍAN AL SÍNDROME DE DOWN**

**ANÁLISIS GENERAL DE UN ESTUDIO DE
RIESGO GEODINÁMICO (CASO
METEOROLÓGICO, VOLCÁN POPOCATÉPETL
Y SIERRA NORTE) EN EL ESTADO DE
PUEBLA, MÉXICO**



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA

Revista de las divisiones de CBI y CBS



Contenido

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

No. 146 Abril - Junio 2026

Editorial	3		
<hr/>			
<i>Explorando el valor de los paisajes bioculturales, un ejemplo en la zona Mazahua</i>	5	<i>Microgeles: una revolución en la ingeniería biomédica</i>	57
Dr. Hublester Domínguez Vega		Dr. G. Sánchez Balderas	
Dra. Yuriana Gómez Ortiz		Dra. Sarita Montaña	
Dra. Clarita Rodríguez Soto		Dra. C.L. Moraila Martínez	
Dra. Araceli Mendieta Ramírez		Dr. M. Bramini	
Dr. Jonás Álvarez Lopezello		Dra. P. Sánchez Moreno	
		Dr. M.A. Fernandez Rodriguez	
<i>CRISPR-Cas9 entra en acción: las tijeras moleculares que desafían al síndrome de Down</i>	18	<i>Inteligencia Artificial en el desarrollo de fármacos: retos y oportunidades para su uso responsable</i>	67
M. en C. Beatriz Elena González Contreras		Dr. Jorge Arturo Hernández Valencia	
Dra. en C. Virginia Flores Morales		Dr. Martiniano Bello Ramírez	
Dra. en C. Carmen Judith Serrano Escobedo			
<i>Análisis general de un estudio de riesgo geodinámico (caso meteorológico, volcán Popocatepetl y Sierra Norte) en el estado de Puebla, México.</i>	26	<i>Contaminación por ozono en cinco sitios de la Zona Metropolitana del Valle de México</i>	76
Dr. Rogelio Ramos Aguilar		Lic. Armando Correa García	
Mtra. Patricia Máximo Romero			
Mtro. Máximo Ávila Cruz		<i>Salud mental del personal docente de Educación Media Superior ante los retos de las adecuaciones curriculares en la Nueva Escuela Mexicana.</i>	94
Mtro. Víctor Galindo López		Dr. M. A. Flores Mejía	
Pasante Perla Cano Maceda		Dr. R. González Cruz	
Pasante Perla Yoselyne Valencia Fuentes			
Pasante Jessica Azucena Mejía Hernández			
Estudiante Mayumi López López			
Estudiante Juan Pablo Velazquez Aparicio			

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

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

Rector General

Dr. Gustavo Pacheco López

Secretaria General

Dra. Esthela Irene Sotelo Núñez

UNIDAD IZTAPALAPA

Rectora

Dra. Edith Ponce Alquicira

Secretario

Dr. Javier Rodríguez Lagunas

Director de la División de Ciencias

Básicas e Ingeniería

Dr. 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.

3^a Época, No. 146, Abril - Junio 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 Junio de 2026. Tamaño del archivo 52.9 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:

Abril - Junio 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

La presente edición reúne investigaciones que reflejan la diversidad y relevancia de los desafíos que enfrenta nuestra sociedad. Los trabajos aquí presentados abordan temas relacionados con la conservación de los paisajes bioculturales, los riesgos ambientales y la calidad del aire, así como avances científicos en edición genética, ingeniería biomédica e inteligencia artificial aplicada al desarrollo de fármacos.

Asimismo, se incluye una reflexión sobre la salud mental del personal docente ante los retos de la transformación educativa en México, destacando la importancia del bienestar humano en los procesos de cambio social.

En conjunto, estos artículos muestran cómo la ciencia, la tecnología y las ciencias sociales contribuyen a la comprensión y solución de problemas contemporáneos, fortaleciendo el vínculo entre el conocimiento y las necesidades de la sociedad.

Esperamos que esta edición sea de interés para nuestros lectores y motive nuevas reflexiones e iniciativas de investigación.

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.

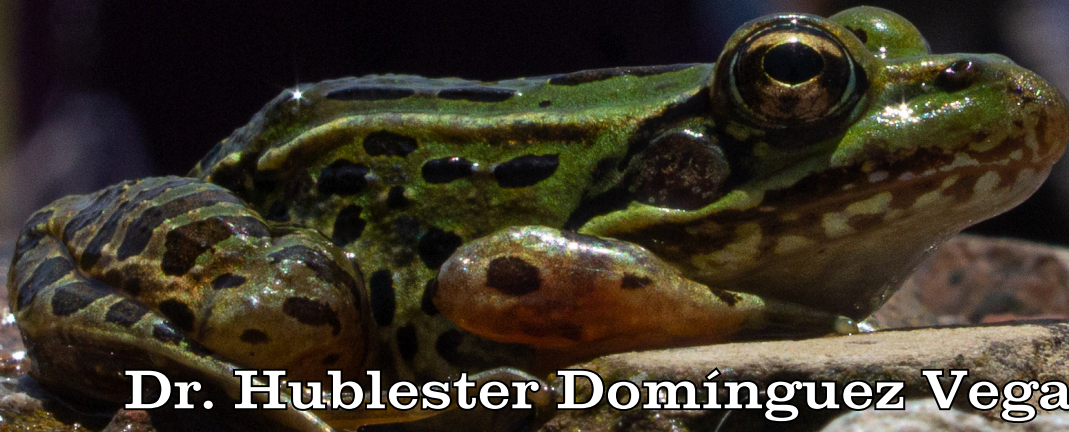
Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186.

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.

Explorando el valor de los paisajes bioculturales, un ejemplo en la zona Mazahua



Dr. Hublester Domínguez Vega

División de Desarrollo Sustentable, Universidad Intercultural del Estado de México.

Dra. Yuriana Gómez Ortiz

División de Desarrollo Sustentable, Universidad Intercultural del Estado de México

Dra. Clarita Rodríguez Soto

Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México

Dra. Araceli Mendieta Ramírez

Universidad Mexiquense del Bicentenario

Dr. Jonás Álvarez Lopeztello

División de Desarrollo Sustentable, Universidad Intercultural del Estado de México.

Abstract

Biocultural landscapes are products of the interaction between human communities and the environment where they are established. These sites show the interdependency among humans, species, and abiotic elements of ecosystems; thus, biocultural landscapes are very useful in the pursuit of conservation of species and culture. In this article, we explore the value of biocultural landscapes under the current environmental and cultural crisis. We use the characterization of the biocultural landscape of the Mazahua region of the State of Mexico as an example. This exercise also looks for the acknowledgment of the importance of collaborative work between academia and local communities to contribute to biocultural conservation.

Keywords: Biocultural landscape, Knowledge coproduction, biocultural conservation, anthropization.

Resumen

Los paisajes bioculturales son producto de la interacción entre las comunidades humanas y el ambiente en el que se establecen. Estos espacios ilustran la dependencia mutua entre los seres humanos con los otros seres vivos y con los elementos abióticos de los ecosistemas; por lo tanto, resultan muy útiles en la búsqueda de la conservación de las especies y la cultura. En este artículo exploramos el valor de los paisajes bioculturales bajo la crisis ambiental y cultural que enfrentamos en la actualidad. Usamos como ejemplo el paisaje biocultural asociado al agua en la zona Mazahua del Estado de México. Este ejercicio también pretende divulgar la importancia del trabajo colaborativo entre academia y comunidades locales para contribuir a la conservación biocultural.

Palabras clave: Paisaje biocultural, coproducción de conocimiento, conservación biocultural, antropización.

Preservando la vida y la cultura: un enfoque integrado para la crisis biocultural

En el corazón del Estado de México, las comunidades Mazahua luchan por mantener vivas sus tradiciones, sus lenguas y la conexión ancestral con la tierra que los sustenta. Pero, igual que en resto de nuestro planeta, una crisis se cierne sobre este paisaje biocultural único: la crisis de extinción convergente. El planeta transita una crisis que amenaza la diversidad biológica. Actualmente, la unión internacional para la conservación de la naturaleza (UICN), reconoce más de 1000 especies extintas en la historia reciente y más de 10 mil críticamente amenazadas de extinción, destacando a los anfibios como el grupo más impactado (IUCN, 2024). Estos datos confirman que enfrentamos la sexta extinción masiva. Para comprender la magnitud del problema, cabe recordar que, en los 4000 millones de años de vida en la tierra, sólo ha habido cinco extinciones masivas; la última, hace aproximadamente 66 millones de años en la que se extinguieron los dinosaurios junto con tres cuartas partes de los animales y plantas.

Así mismo, enfrentamos una crisis social que amenaza la diversidad cultural. Las lenguas desarrolladas por nuestros ancestros a lo largo de miles de años también están desapareciendo y con ellas, desaparece una gran parte de los conocimientos locales, su forma de entender el mundo y las diferentes formas de relacionarse con él a través de prácticas de manejo de los recursos naturales y de la espiritualidad. Alarmanamente, la UNESCO estima

que casi la mitad de las 6700 lenguas del planeta podrían extinguirse antes de que termine el siglo, llevándose consigo milenios de conocimiento ancestral (UNESCO, 2024).

Se han planteado diferentes estrategias encaminadas a atender estos problemas. Por ejemplo, para la conservación de la biodiversidad, se han establecido áreas protegidas que cubren aproximadamente el 17.6% de la superficie terrestre y el 8.4% de los mares. En términos de la protección de la cultura, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura (UNESCO) desarrolla una amplia gama de estrategias para proteger el patrimonio material e inmaterial de la cultura. De manera similar, los gobiernos de muchos países implementan estrategias para la protección del patrimonio cultural. En México, por ejemplo, existe el Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas (INPI), una instancia gubernamental dedicada al reconocimiento, respeto y ejercicio efectivo de los derechos de los pueblos indígenas y afrodescendientes.

Sin embargo, a pesar de estas iniciativas, la crisis biocultural persiste, lo que nos lleva a preguntarnos si necesitamos

un enfoque más holístico y centrado en la interconexión entre naturaleza y cultura en el que se reconozca que las diferentes visiones de la realidad (p. ej. académico y de actores fuera de la academia) constituyen una parte de la comprensión de los problemas y que debemos incorporar diferentes visiones para generar una imagen enriquecida que nos permita entender mejor los problemas actuales (Tengö, 2021).

¿Qué son los paisajes bioculturales?

En los últimos años han surgido varias propuestas de trabajo colaborativo para la conservación. Los paisajes bioculturales, entendidos como el resultado de la interacción entre las comunidades humanas y el ambiente en el que se establecen, son una de estas propuestas. Los paisajes bioculturales incluyen a todos los seres vivos, los componentes no vivos y los culturales; tanto tangibles (e.g. especies, montañas, monumentos), como intangibles (interacciones bióticas, ciclos biogeoquímicos, ceremonias; Figura 1). Podríamos decir que los paisajes bioculturales son tapices, tejidos con hilos de naturaleza y cultura; el tapiz no puede mantener su forma y su identidad sin los hilos de ambas partes.



Figura 1: Los paisajes bioculturales incluyen componentes biofísicos y socioculturales, así como aspectos tangibles e intangibles.

Con el paso del tiempo, la relación entre las comunidades y su medio ha generado un sinfín de expresiones. La apariencia que da identidad a nuestros poblados es una clara evidencia de esta relación; la forma y dimensiones de las calles, en lugares montañosos en comparación con los valles, los materiales de construcción en los lugares fríos y cálidos. También podemos pensar en el desarrollo de técnicas de cultivo ajustadas a las diferentes especies, condiciones climáticas y topográficas y las creencias y ceremonias ligadas a los cambios ambientales y, en consecuencia, a los ciclos sociales.

Actualmente existe un reconocimiento amplio de que nuestras actividades modifican nuestro entorno y que esta

modificación resulta negativa para otros seres vivos y en general, para el ambiente. Pero existe un aspecto fundamental que normalmente pasamos por alto, cuando nuestro ambiente cambia, nosotros también podemos ser afectados de manera negativa. Cada día es más evidente esta situación, la emergencia de nuevas enfermedades y el impacto directo e indirecto de los eventos climáticos extremos sobre nuestro bienestar son un claro recordatorio. Esta característica, conocida como interdependencia, constituye el núcleo de los paisajes bioculturales. Pensemos en un bosque que es talado; no sólo se han perdido los árboles, también se han ido las fuentes de agua, plantas medicinales, lugares sagrados. Cuando reconocemos la interdependencia de

los paisajes bioculturales, resulta evidente que el conocimiento detallado de nuestros paisajes bioculturales es fundamental para tomar decisiones de transformación que garanticen su estabilidad.

Un ejemplo de paisaje biocultural en la zona Mazahua

Como es normal en las nuevas áreas de investigación, la literatura existente sobre los paisajes bioculturales es escasa. Los estudios rara vez incluyen técnicas dirigidas a la caracterización de los paisajes bioculturales (i. e. que componentes deben ser considerados y cómo pueden ser registrados). En la Universidad Intercultural del Estado de México desarrollamos un proyecto para contribuir a la conservación del paisaje

biocultural Mazahua. Trabajamos en siete localidades pertenecientes a tres municipios, donde se establecen comunidades Mazahuas (Figura 4). San Felipe del Progreso se ubica, al nor-noroeste del Edo de México, tiene una extensión de 856 km² y es el municipio más poblado de la zona de estudio, (101,980 habitantes; INEGI, 2020), la población indígena representa el 64.9% de la población total del municipio. Por su parte, Jocotitlán tiene una extensión de 276 km², cuenta con 119,454 habitantes, de estos el 35.1% son indígenas. Finalmente, en el municipio de San José del Rincón tiene una población de 102,931 habitantes, el 64.9% es población indígena.

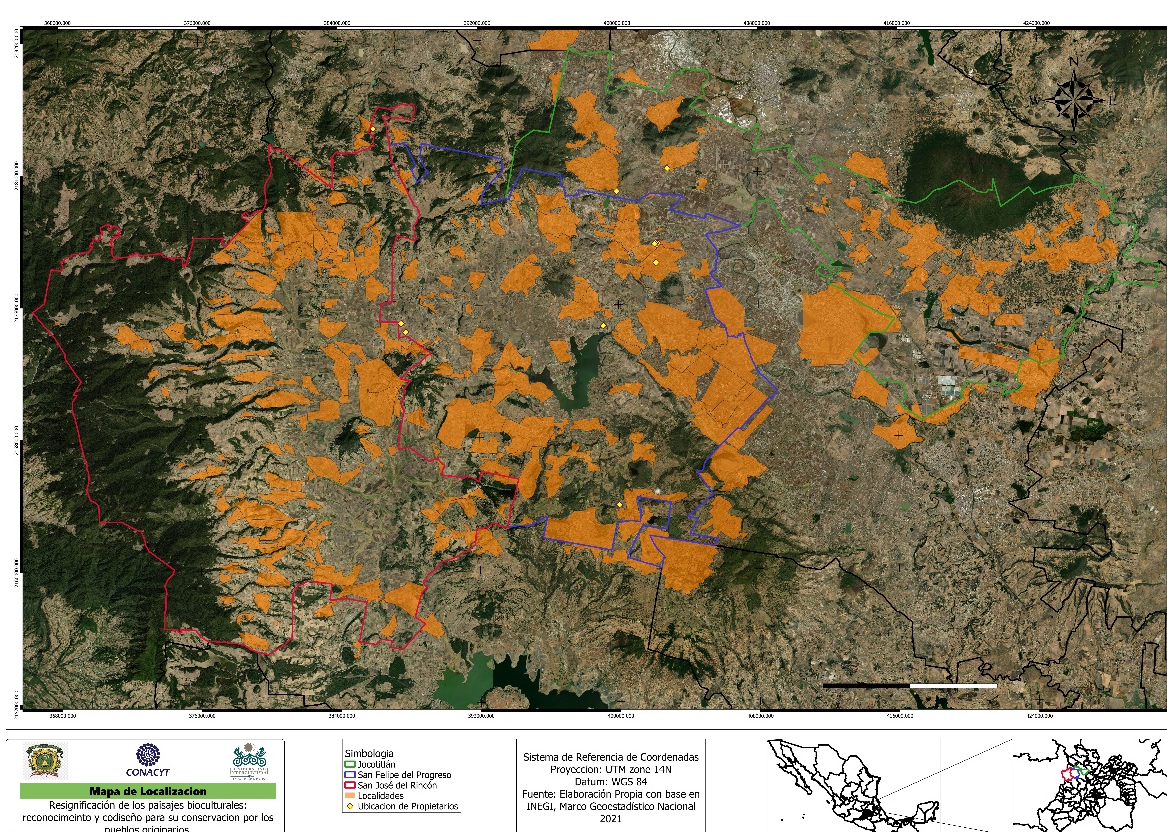


Figura 2: Biodiversidad del paisaje biocultural Mazahua. Plantas con flores (PcF), plantas sin flores (PsF), hongos (H), musgos (Mu), mamíferos (Ma), aves (Av), reptiles (R), anfibios (An), insectos (In), otros artrópodos (ArIn) y otros invertebrados (OI).

Uno de los primeros retos fue precisamente el conocimiento del paisaje a través de sus componentes; para ello generamos una propuesta metodológica participativa. Utilizamos el paisaje biocultural asociado al agua a manera de ejemplo para fomentar el estudio integral de estos espacios y su conservación. Nuestro propósito es contribuir al reconocimiento de los paisajes bioculturales y su importancia en la conservación de la biodiversidad y la cultura mediante un ejemplo de trabajo en la zona Mazahua. A continuación, presentamos la síntesis metodológica usada en cada etapa, así como los resultados obtenidos.

Caracterización biótica: reconociendo a los otros seres vivos que nos acompañan

Para reconocer a los seres vivos con los que compartimos los paisajes acuáticos diseñamos un ejercicio de coproducción de conocimientos a partir del conocimiento local y el académico. Es decir, trabajamos junto con integrantes de las comunidades Mazahua para reconocer la biodiversidad que nos rodea. En primer lugar, la academia se encargó de recopilar datos de ocurrencia de especies a través de plataformas digitales como Naturalista y GBIF, artículos científicos y tesis de licenciatura y posgrado. Por otra parte, los representantes de siete comunidades aportaron sus conocimientos, indicando nombres de las especies, sitios de ocurrencia, percepción de su abundancia. Posteriormente, se planearon actividades para el registro de especies en campo. Los participantes con experiencia académica explicaron técnicas como el fototrampeo, búsqueda activa, puntos de conteo, identificación de especies por cantos y ultrasonidos, las cuales fueron aplicadas para completar esta etapa.

El segundo paso fue el intercambio mutuo de conocimientos para generar una base de conocimientos compartida entre los integrantes del equipo a través de diálogos, posteriormente se realizó un ejercicio de mapeo participativo, donde se ubicaron los sitios donde se concentra la biodiversidad del paisaje asociado a los cuerpos de agua. Finalmente, aplicamos la técnica del sendero participativo, en la cual tanto académicos como representantes locales recorrimos algunos de los espacios identificados en el paso anterior para profundizar en el conocimiento sobre la biodiversidad. Los representantes de las comunidades aportaron usos, creencias y conocimientos locales sobre la biodiversidad. Por ejemplo, la época en la que llegan los patos migratorios y los sitios donde llegan más individuos, los usos alimenticios y las técnicas de captura utilizadas en la actualidad y en el pasado. Por su parte los representantes de la academia aportaron conocimientos científicos sobre diferentes aspectos de la biología y ecología de la biodiversidad local, como las categorías de riesgo de las especies o la forma para identificar a las serpientes venenosas.

Como resultado de este ejercicio, pudimos reconocer que el paisaje biocultural cuenta con una gran riqueza biológica. Las plantas con flores son el grupo más conspicuo; tanto en las bases de datos digitales como en el conocimiento local; también son el grupo más estudiado en las tesis de la región. Entre los vertebrados, los registros de ocurrencia son relativamente escasos; sin embargo, las personas mencionan la ocurrencia de varias especies evidenciando el valor de los paisajes bioculturales para estos animales. Otros grupos como los artrópodos y los hongos también están presentes

tanto en el conocimiento local como en el académico; sin embargo, existe poca información sobre su diversidad por lo que pueden considerarse focos de atención para mejorar el conocimiento de la biodiversidad presente en los paisajes bioculturales.

En general, podemos afirmar que el conocimiento local y el académico resultan complementarios para reconocer la biodiversidad de los paisajes. Las personas identifican un gran número de especies en diferentes grupos biológicos. El aporte único de las comunidades al conocimiento sobre la biodiversidad es el vínculo entre las personas y las especies a través de

los usos, percepciones e interacciones; pero, como se ha evidenciado gracias a la ciencia ciudadana, la participación local también puede contribuir significativamente a entender aspectos ecológicos como la distribución, abundancia o incluso la relación entre las especies y la calidad del hábitat. Por su parte, el conocimiento académico alberga información en bases de datos digitales, algunos artículos y tesis que nos permiten reconocer más especies que las identificadas localmente y asociar a las especies con los diferentes hábitats del paisaje, entre otros aspectos de ciencia básica (Figura 2, 3).

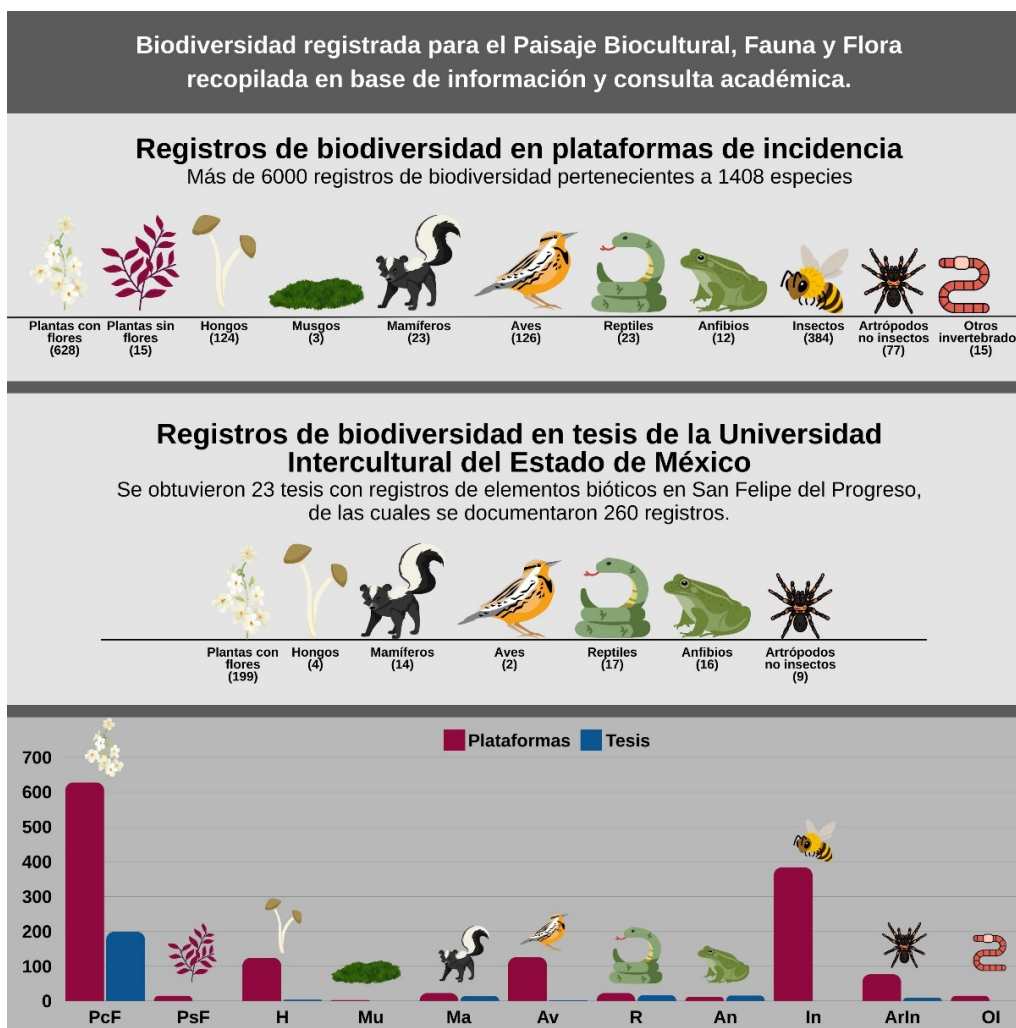


Figura 3: En el paisaje biocultural se reconoce una gran biodiversidad asociada a los sistemas acuáticos.

BIODIVERSIDAD DEL PAISAJE BIOCULTURAL ASOCIADO AL AGUA

Flora y fauna reconocida por los miembros del Corredor Hortícola de las comunidades aledañas a San Felipe del Progreso, Estado de México

Proyecto 322665 Financiado por CONAHCYT Etapa 1-2023

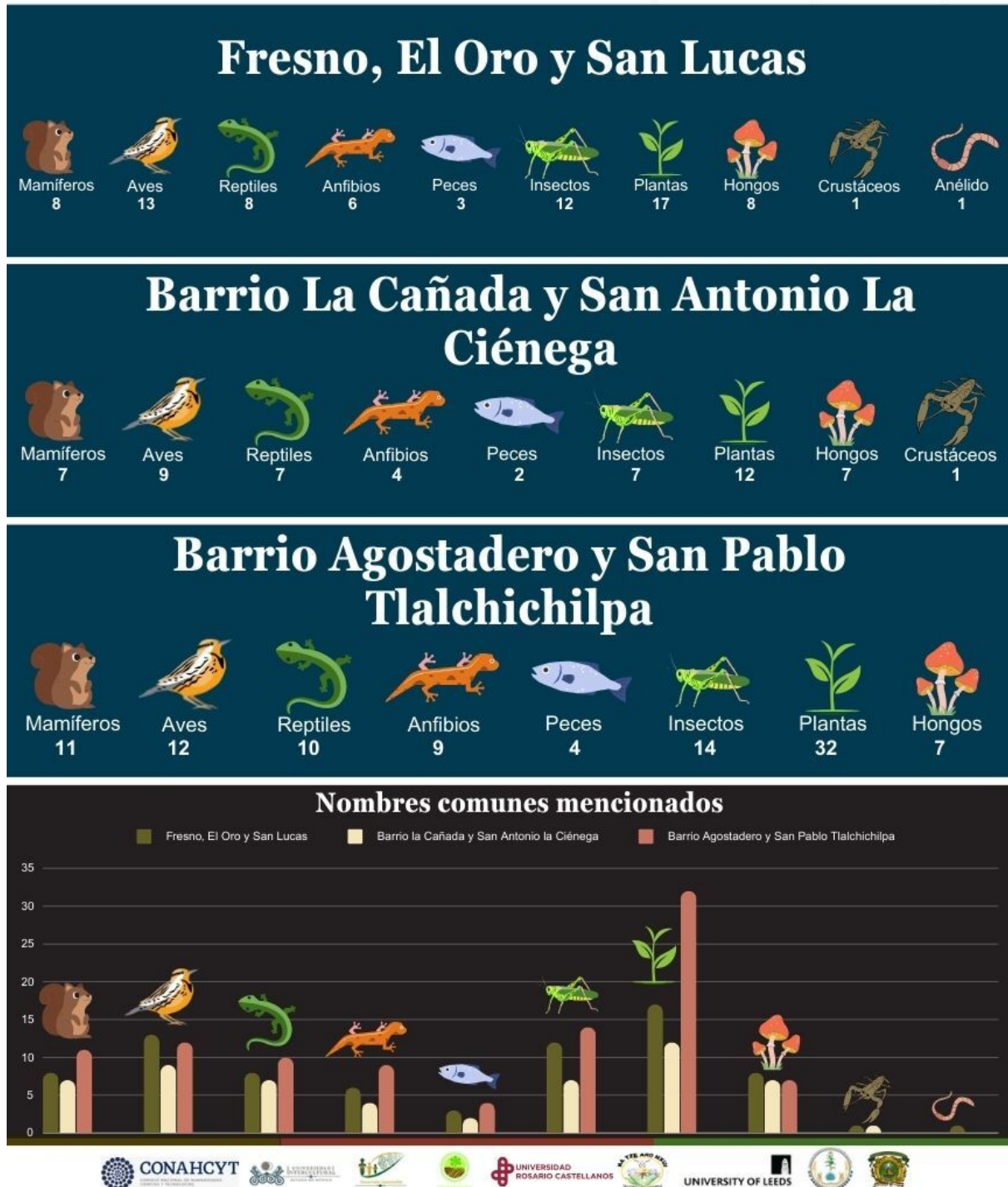


Figura 4: Nuestro estudio incluyó siete localidades en tres municipios de la zona Mazahua.

Descifrando el paisaje Mazahua: un análisis del espacio donde vivimos

Para reconocer los componentes no vivos del paisaje y comprender cómo las comunidades interactúan con su entorno, iniciamos con una búsqueda detallada de datos oficiales sobre el espacio que habitamos, imágenes satelitales y el invaluable conocimiento local. Entre los aspectos que consideramos para esta parte del trabajo se encuentran la localización de los paisajes bioculturales Mazahuas, la descripción de las características del terreno (topografía), los escurrimientos, la vegetación existente y la distribución de las actividades locales (uso de suelo; INEGI, 2010; ESA, 2022). Adicionalmente, se realizó un taller de cartografía participativa con los representantes de las comunidades, donde los integrantes del equipo ubicaron sobre un mapa los cuerpos de agua, así como las condiciones ambientales (contaminación, disponibilidad y calidad del agua, conflictos sociales en torno al acceso, entre otros) asociadas.

En cuanto a las características del terreno, reconocimos que en San José del Rincón se presenta la zona más accidentada ya que en este municipio se encuentra una sierra donde incluso se pueden observar dos volcanes. La forma del relieve en esta zona se ha relacionado con una menor población y con menor presencia de vías de comunicación. En San Felipe del Progreso, el terreno está dominado por valles al oeste y un lomerío en la parte norte-centro. En este municipio también hay volcanes, uno está en el centro y tres más en la parte del sur del municipio, formando una pequeña sierra. En cuanto al municipio de Jocotitlán, al oeste se observan dos volcanes. En toda la zona central tenemos una planicie que se extiende hacia el sur y sureste. La característica

del terreno más representativa del municipio es el volcán llamado “el cerro de Jocotitlán” (INEGI, 2010), que además es la montaña más emblemática de la región.

Los paisajes en los que trabajamos forman parte de la cuenca del río Lerma. Esto significa que el agua de la zona escurre hacia el río del mismo nombre, razón por la que este río ha sido considerado de suma importancia para las comunidades a través del tiempo. Aquí también se localiza la Sierra de Guadalupe, zona montañosa con pendientes pronunciadas, considerada una fuente muy importante de agua gracias a los pequeños arroyos y manantiales. La combinación de estos escurrimientos y cuerpos de agua genera áreas clave para la biodiversidad; en nuestros paisajes, destaca la laguna de Tepetitlán como un foco de valor biocultural. El reconocimiento del espacio que nos rodea es crucial para entender la interacción humana con el agua y sus implicaciones para lograr la sustentabilidad y la resignificación de los paisajes bioculturales.

La agricultura es el corazón de la región, esto lo podemos apreciar claramente en la superficie del territorio, la cual está cubierta de cultivos de temporal, de riego y de humedad anual (Figura 5). La agricultura representa la principal fuente de empleo y sustento para la población; según datos de la Secretaría del Campo del Estado de México, entre San Felipe, San José y Jocotitlán se acumula un poco más del 10% de la superficie sembrada en la entidad, con un total de 126,300 hectáreas. El maíz es un emblema de la zona por su importancia cultural y económica; representa el 40% de la superficie sembrada, seguido del frijol (20%) y trigo (10%).

Desafortunadamente los ecosistemas originarios, representados por bosques templados, pastizales y humedales, están severamente degradados. Los remanentes de bosques se ubican principalmente al norte y oeste de la

zona, predominando bosque de oyamel y bosque de encino-pino. Mientras que los humedales y pastizales se encuentran distribuidas principalmente en la zona centro.

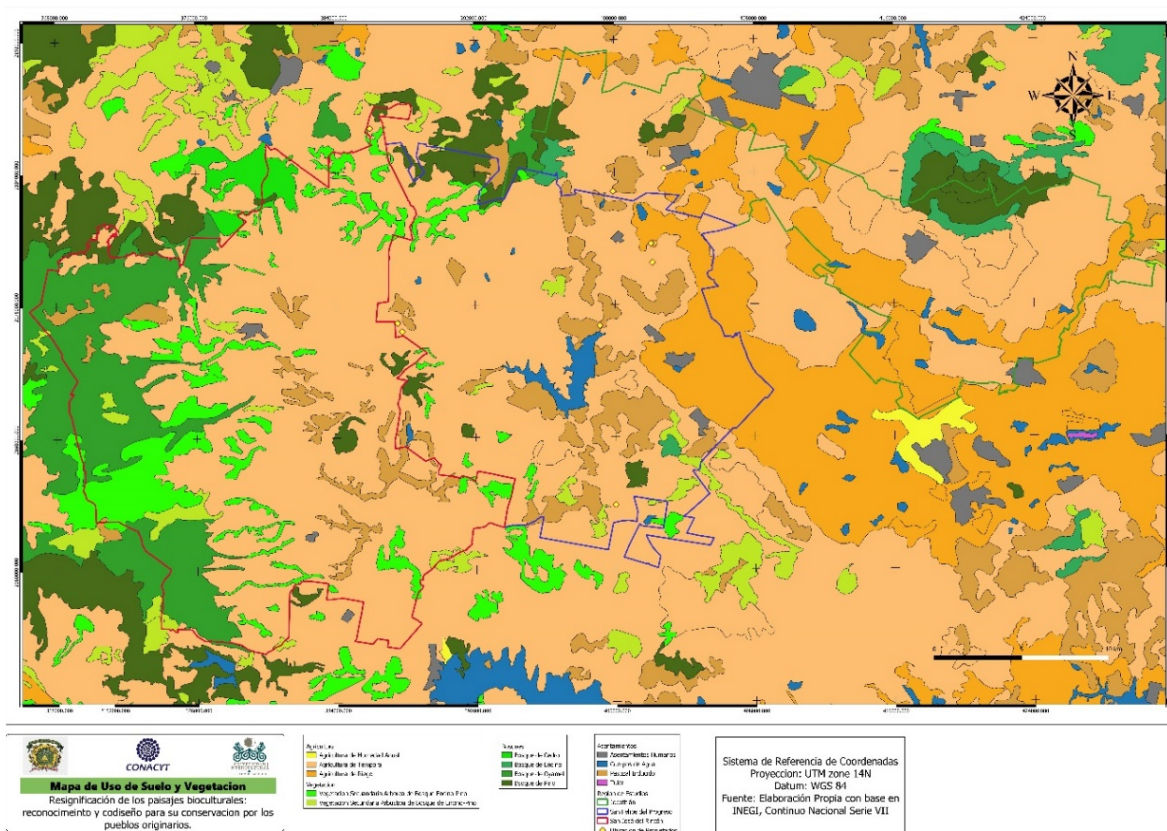


Figura 5: Los ecosistemas del noroeste del Estado de México están severamente alterados por las actividades humanas.

El mapeo participativo nos permitió visualizar las características y problemáticas pasadas y actuales de los paisajes, tal cual son percibidas por las comunidades. Las comunidades nos compartieron su visión del paisaje, resaltando la conexión entre la disponibilidad del agua y las actividades locales. El agua se considera vital y tiene una gran importancia cultural y económica. En algunas comunidades aún se percibe una buena calidad y disponibilidad de agua, sobre todo aquellos aledaños a áreas forestales; sin embargo, en estos sitios existen conflictos sociales referentes a la

tenencia de la tierra y, en consecuencia, al acceso al agua. Por el contrario, en otras localidades se percibe una grave contaminación del agua que impide su uso para cualquier actividad productiva y/o cultural, además de una continua disminución en la disponibilidad, estos sitios se encuentran principalmente cerca de las zonas urbanas y cultivos e incluyen a la laguna de Tepetitlán.

Caracterización cultural: reconociendo nuestra identidad

La etnografía es una herramienta muy útil para conocer la cultura de las comunidades; en nuestro caso, la usamos

para describir la apropiación del paisaje biocultural a través de técnicas como la observación participante, entrevistas individuales y grupales, así como la identificación de las prácticas locales. La etnografía como método de investigación permite estudiar la experiencia humana colectiva, la historia, costumbres, prácticas, sabidurías y lenguajes de una cultura, entretejiendo la imaginación y la realidad en las múltiples miradas, voces y representaciones colectivas. La etnografía ha contribuido a ampliar el conocimiento sobre la diversidad, pluralidad y diferencia de los modos de vida y ha proporcionado una base para los análisis socioculturales (Guber, 2013; Guerrero, 2016).

Para el reconocimiento de la cultural local, el primer paso consistió en ir al encuentro de los representantes comunitarios y observar sus interacciones con los paisajes del agua. Sus relatos y perspectivas nos permitieron vincular los datos sobre biodiversidad y espacio con sus saberes. En el intercambio de ideas con los protagonistas del territorio, escuchamos lo que dicen del paisaje y cómo lo dicen sus habitantes. Esto es conocido como la construcción del territorio, y permite entender el significado que tienen las especies, las montañas, los ríos, para las personas y, en última instancia, el sentimiento de pertenencia y los vínculos emocionales entre personas y naturaleza. Además, estos sentimientos y valores explican la memoria colectiva, mediante los relatos de vida y nos ayudan a identificar los cambios al caminar las veredas, los ríos, lagunas, nacimientos de agua.

Así pudimos interpretar la relación entre las personas y los demás componentes del paisaje a través de relatos, sentimientos y prácticas.

Logramos reconocer que existe un vínculo muy fuerte con algunas especies como las serpientes. Para los Mazahuas, las serpientes asociadas al agua (Xits´kala), se consideran guardianes. Estos animales no deben ser agredidos, porque se corre el riesgo de que el espíritu protector del agua castigue a los agresores de diferentes formas, entre ellas, puede desaparecer el agua. Otras especies vinculadas a las creencias locales son las ranas (Wëë). Las ranas también deben ser protegidas, ellas son las encargadas de llamar la lluvia a través de sus cantos. Muchas otras especies están vinculadas a la cultural Mazahua, algunas pueden ser consideradas peligrosas, como las serpientes alicantes (Kijmi); muchas son usadas como alimento o medicina como el falso camaleón (Xits´si).

Los elementos abióticos también son muy importantes en el paisaje biocultural Mazahua. Las personas nos compartieron su conocimiento respecto al estado actual de diferentes cuerpos de agua y reconocen que la mayoría de los arroyos, ríos y humedales se han contaminado. También tienen muy presente que muchos de estos lugares han disminuido su tamaño (en el caso de los humedales) o su caudal (en el caso de los ríos y manantiales). Estos cambios han impactado en aspectos básicos de las personas, como la alimentación y las prácticas cotidianas a través de las cuales se fortalece su relación con la naturaleza. Por ejemplo, varias personas, principalmente hombres, recuerdan que la pesca era una actividad común en la región. Para esta práctica, se empleaban diferentes técnicas, como la construcción de trampas elaboradas a mano, utilizando ramas de árboles que crecen en las márgenes de los arroyos. La colecta de quelites, charales y acociles en los humedales también era muy común.

Aunque esta práctica no ha desaparecido del todo, si ha disminuido de manera notable. Pero sin duda, una de las consecuencias más graves del deterioro del paisaje es el desapego de las personas y, en consecuencia, su desvalorización.

Conclusión

Con las técnicas aplicadas generamos nuevos conocimientos sobre la diversidad del paisaje biocultural Mazahua. Los ejercicios colaborativos nos permitieron reconocer que la diversidad biocultural de la zona incluye un elevado número de especies y que muchas de ellas están interactuando con las personas de forma directa e indirecta. Los componentes abióticos del paisaje también son de gran importancia en la zona Mazahua, debido al fuerte vínculo con los sistemas acuáticos, los manantiales, ríos y lagos están vinculados con las creencias, prácticas y usos locales. Es claro que los componentes bióticos y abióticos tienen una fuerte influencia sobre la cultural local, la cual a su vez está influenciando de forma continua y dinámica a las especies, los arroyos, las montañas. Los ejercicios colaborativos demuestran ser herramientas poderosas para desentrañar los paisajes bioculturales, revelando la intrincada conexión entre sus componentes. Desafortunadamente, en la zona Mazahua igual que en muchos otros lugares, hemos dejado de reconocer la importancia de la conservación de los otros seres vivos y de los elementos abióticos para mantener nuestros ecosistemas. El proyecto desarrollado en la Universidad Intercultural del Estado de México continúa aplicando actividades junto con las comunidades para fomentar la resignificación del paisaje biocultural y apoyar a su conservación. La inercia de la forma en la que nos hemos relacionado con la naturaleza en los últimos siglos es difícil

de revertir y amenaza a la vida y la cultura en todo el planeta. Para combatir la crisis de extinción convergente en nuestros paisajes bioculturales, es necesario implementar estrategias de manejo y conservación basadas en enfoques participativos, donde academia, gobierno, comunidades y otros actores sociales, aporten su visión sobre el mundo en el que vivimos y el mundo que queremos para nuestros hijos.

Referencias

- [1] European Space Agency (ESA) (2022). SNAP - Sentinel Application Platform desktop: 8.0. European Space Agency. <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>
- [2] Guber, R. (2013). *La articulación etnográfica*. Ed. Biblos/Culturalia, Argentina.
- [3] Guerrero Arias, P. (2016). *El trabajo de campo antropológico*. Ed. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
- [4] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2010). Marco Geoestadístico Municipal 2010, San Felipe del Progreso versión 4.3.
- [5] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2020). Censo de población y vivienda 2020. Recuperado el día 18 de diciembre de 2024 de: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- [6] IUCN (2024). The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2024-2. Recuperado el día 18 de diciembre de 2024 de: <https://www.iucnredlist.org>
- [7] Tengö M., Austin, B., Danielsen, F. y Fernández-Llamazares, A. (2021). Creating

- [8] Synergies between Citizen Science and Indigenous and Local Knowledge.
- [9] *BioSci*, 71[5], pp. 503-518. Doi: <https://doi.org/10.1093/biosci/biab023>
- [10] UNESCO (2024). La unesco celebra el decenio internacional de las lenguas indígenas. Recuperado el día 18 de diciembre de 2024 de: <https://www.unesco.org/es/articles/la-unesco-celebra-el-decenio-internacional-de-las-lenguas-indigenas>.

CRISPR-Cas9 entra en acción: las tijeras moleculares que desafían al síndrome de Down

M. en C. Beatriz Elena González Contreras

Doctorado en Ciencias con Orientación en Medicina Molecular,
Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México; Unidad
de Investigación Biomédica de Zacatecas, Instituto Mexicano del
Seguro Social, Zacatecas, México.

Dra. en C. Virginia Flores Morales

Ingeniería Química, Unidad Académica de Ciencias Químicas,
Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México;
Doctorado en Ciencias con Orientación en Medicina Molecular,
Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México.

Dra. en C. Carmen Judith Serrano Escobedo

Unidad de Investigación Biomédica de Zacatecas, Instituto
Mexicano del Seguro Social, Zacatecas, México.

Abstract

Down syndrome is a genetic condition caused by an extra copy of chromosome 21, which affects the physical and cognitive development of those who have it. Although modifying this genetic cause remains a major challenge, experimental approaches are being explored to inactivate or eliminate the extra chromosome during the early stages of development. Recently, a group of scientists used stem cells derived from individuals with Down syndrome and applied the gene-editing tool CRISPR-Cas9 to selectively remove the extra copy of chromosome 21. This experimental intervention normalized the chromosome number in 37.5% of the treated cells, without affecting other chromosomes. This breakthrough opens the door to strategies that could enable intervention before birth to correct genetic alterations such as those seen in Down syndrome.

Keywords: Down Syndrome, Trisomy 21, CRISPR-Cas9, Gene editing.

Resumen

El síndrome de Down es una condición genética causada por una copia extra del cromosoma 21, que afecta el desarrollo físico y cognitivo de quienes lo presentan. Aunque modificar esta causa genética representa un gran desafío, se están explorando métodos experimentales para inactivar o eliminar el cromosoma adicional en etapas tempranas del desarrollo. Recientemente, un grupo de científicos utilizó células madre derivadas de personas con síndrome de Down y aplicaron la herramienta de edición genética CRISPR-Cas9 para eliminar selectivamente la copia extra del cromosoma 21. La maniobra experimental normalizó el número de cromosomas en el 37.5% de las células tratadas, sin afectar otros

cromosomas. Este avance abre la puerta a estrategias que podrían permitir intervenir antes del nacimiento para corregir alteraciones genéticas como las del síndrome de Down.

Palabras clave: Síndrome de Down, Trisomía 21, CRISPR-Cas9, edición genética

Síndrome de Down

El síndrome de Down es una condición genética que ocurre cuando una persona nace con una copia adicional del cromosoma 21. Aunque pueda parecer un cambio pequeño en el material genético, tiene un impacto significativo en el desarrollo físico y en las habilidades cognitivas, convirtiéndose en una de las principales causas de discapacidad intelectual en el mundo. Se estima que ocurre en uno de cada 1000 nacimientos a nivel mundial, mientras que en México se calcula que aproximadamente uno de cada 659 bebés nace con esta condición. Durante décadas, la medicina se ha enfocado en atender las condiciones de salud asociadas a esta alteración, buscando mejorar la calidad de vida de quienes lo presentan. Si bien las personas con esta condición pueden llevar una vida plena, la posibilidad de modificar su causa genética sigue representando un gran desafío para la ciencia (NICHD, 2012)

El papel de los cromosomas: Las instrucciones del cuerpo humano

Para entender mejor el síndrome de Down, es necesario conocer qué son los cromosomas. En el núcleo de cada célula del cuerpo humano se encuentra el ácido desoxirribonucleico (ADN), una molécula que contiene las instrucciones necesarias para que el cuerpo crezca, funcione y se desarrolle adecuadamente. Estas instrucciones están organizadas

en segmentos llamados genes, que a su vez se agrupan en estructuras con forma de bastón conocidas como cromosomas.

Normalmente, cada persona tiene 46 cromosomas organizados en 23 pares, de estos 22 pares se denominan autosomas

y controlan características físicas como el color de los ojos, el desarrollo óseo o el funcionamiento del corazón. El par restante corresponde a los cromosomas sexuales, que determinan el sexo: si eres hombre (XY) o mujer (XX) (Figura 1).

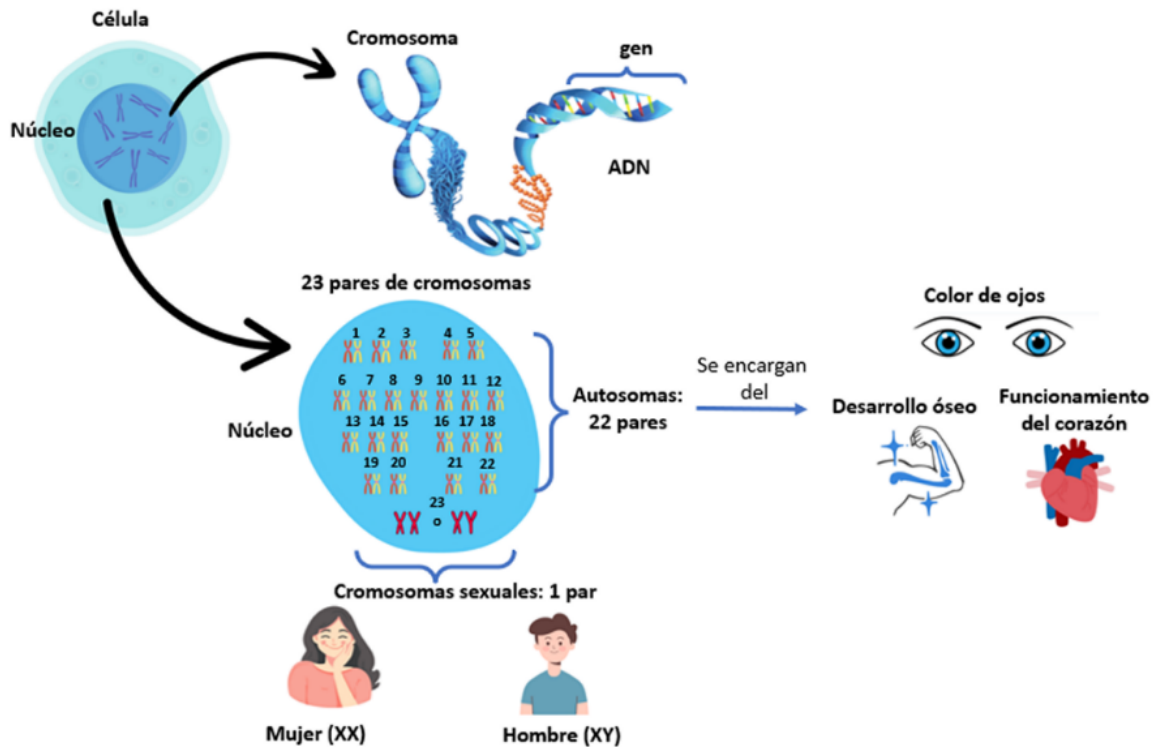


Figura 1: Los cromosomas son estructuras formadas por ADN, organizadas en 23 pares: 22 autosomas, responsables de diversas funciones como color de ojos, desarrollo óseo y funcionamiento del corazón, y un par (XX o XY) que determina el sexo de la persona. Imagen creada en Canva.

Causas del síndrome de Down e impacto social

El síndrome de Down se produce cuando hay tres copias del cromosoma 21 en lugar de las dos habituales, a esto se le llama trisomía 21. La causa más frecuente de esta alteración es un error durante la formación del óvulo, la célula reproductiva aportada por la madre. Normalmente, tanto el óvulo como el espermatozoide (célula reproductiva

del padre), deben aportar una sola copia de cada cromosoma, incluyendo el cromosoma 21. De esta manera cuando ocurre la fecundación, es decir, la unión del óvulo y el espermatozoide, el embrión debe tener dos copias del cromosoma 21, una heredada de la madre y otra del padre. Sin embargo, en algunos casos, el óvulo aporta dos copias del cromosoma 21 y al unirse con un espermatozoide normal, el resultado es un embrión con

tres copias de éste, lo que da lugar al síndrome de Down.

Hay tres tipos de alteraciones cromosómicas que pueden causar el síndrome de Down: 1) La trisomía 21 completa, la forma más común que representa el 95% de los casos y donde todas las células del cuerpo tienen la copia adicional del cromosoma. 2) Trisomía 21 mosaico, ocurre en alrededor del 1% de los casos. En estos, solo algunas células del cuerpo tienen la trisomía, mientras que el resto poseen el número habitual de cromosomas. A esto se le conoce como mosaicismo y ocurre cuando el error en la división celular pasa en una etapa

temprana del desarrollo, después de la fecundación, o cuando algunas células pierden la copia adicional del cromosoma 21. 3) Trisomía 21 por translocación, se manifiesta en aproximadamente el 4% de los casos. En este tipo, la copia extra del cromosoma 21 no está completa, sino que un fragmento de él se adhiere a un cromosoma diferente y se transmite a las células cuando se dividen. Aunque el mecanismo es diferente, las características físicas y cognitivas de la persona con síndrome de Down son muy similares a las de la trisomía completa (Figura 2) (Down Syndrome Achieves, 2024)

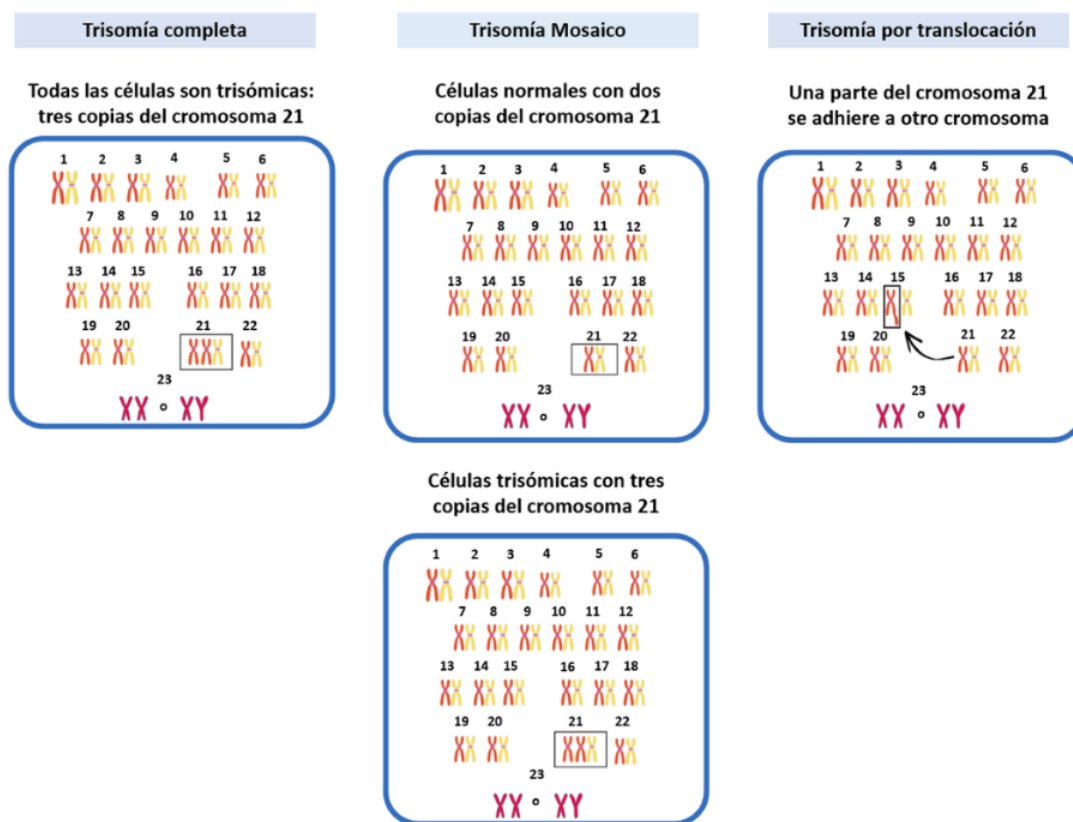


Figura 2: El síndrome de Down puede presentarse en tres formas: trisomía 21 completa (95% de los casos), en la que todas las células tienen una copia extra del cromosoma 21; trisomía 21 mosaico (1%), donde solo algunas células tienen la trisomía; y trisomía 21 por translocación (4%), en la que un fragmento del cromosoma 21 se encuentra adherido a un cromosoma diferente. Imagen creada en Canva.

Estas alteraciones cromosómicas son la causa principal del síndrome de Down y hasta el momento, no se han identificado factores ambientales o del comportamiento relacionado con los padres que lo provoque; tampoco es posible prevenirlo, ni predecirlo con certeza. Las estadísticas muestran que las mujeres de cualquier edad pueden tener un hijo con síndrome de Down, sin embargo, la probabilidad aumenta si la madre es mayor de 35 años (Blanco, 2023).

Es importante mencionar, que una copia extra del cromosoma 21, no solo altera la cantidad de material genético, sino también impacta en el funcionamiento celular, lo cual provoca que las células reciban ciertas señales y produzcan más proteínas de las necesarias, alterando el equilibrio de muchas funciones del cuerpo. Por ejemplo, algunas proteínas afectan el crecimiento y conexión entre las neuronas, otras influyen en el desarrollo físico o aumentan el estrés en las células. Como consecuencia, el cuerpo y el cerebro siguen un camino de desarrollo distinto, funcionan, pero lo hacen a su propio ritmo y con un estilo único (Chen y col., 2019). A esto se le suman ciertos desafíos en la salud, como el riesgo aumentado de enfermedades cardíacas y tiroideas, por lo que es fundamental que las personas con esta condición reciban un seguimiento médico constante (Cleveland Clinic, 2023)

Además, más allá de su origen genético, el síndrome de Down tiene un impacto en la vida de las personas que lo presentan y también en la de su familia, sus cuidadores y la comunidad en la que se desenvuelve. No se trata sólo de una condición médica, sino también de una condición que implica adaptaciones, aprendizajes y una visión diferente sobre el desarrollo y la diversidad. A lo largo

de la historia personas con Síndrome Down han enfrentado barreras sociales, educativas y laborales que han limitado su participación efectiva en la sociedad. La ciencia continúa investigando para comprender mejor esta alteración genética, especialmente en lo que respecta a intervenir en la causa de origen: la presencia de un cromosoma 21 extra en las células. En este sentido, se están buscando enfoques experimentales que intentan inactivar o incluso eliminar este cromosoma adicional en etapas muy tempranas del desarrollo.

El sistema CRISPR-Cas9 y su funcionamiento

Uno de los avances más significativos en el ámbito de la ingeniería genética, es el sistema de Repeticiones Palindrómicas Cortas Agrupadas y Regularmente Interespaciadas con la proteína Cas9 asociada (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats-associated protein 9*, CRISPR-Cas9, por sus siglas en inglés). Este sistema permite modificar secuencias específicas del ADN con gran precisión y está formado por dos elementos principales: una molécula de ácido ribonucleico guía (ARN guía), que es una cadena corta de material genético y una proteína llamada Cas9. El ARN guía actúa como el sistema de posicionamiento global (GPS, una tecnología que permite ubicar con precisión un lugar), dirigiendo a la proteína Cas9 hacia una secuencia específica del ADN que se quiere cortar. Una vez en el sitio, Cas9 corta las dos hebras del ADN, como si fueran unas tijeras moleculares. Este sistema se descubrió como defensa natural en las bacterias, que lo utilizan para defenderse de los virus; pudiendo así conservar fragmentos del ADN de los virus que las han atacado y usando esa información como una especie de

memoria inmunológica. Si el virus vuelve a invadir, la bacteria reconoce su ADN y lo corta con CRISPR-Cas9 para eliminarlo.

A partir del mecanismo natural de CRISPR-Cas9, los científicos lo modificaron para usarlo como una herramienta de edición genética que permite eliminar, corregir o insertar secuencias en el ADN de células humanas con gran precisión (Chen y col., 2019). Recientemente, se ha demostrado incluso que el sistema CRISPR-Cas9 puede utilizarse para eliminar cromosomas completos. Esto se logra haciendo varios cortes específicos en diferentes partes de un mismo cromosoma, lo que lleva a que la célula lo reconozca como dañado y lo deseche (Hashizume y col., 2025). Esto abre grandes posibilidades en la investigación de condiciones genéticas, como el síndrome de Down.

Un ejemplo notable de estos avances se publicó en 2025 por Ryotaro Hashizume y colaboradores (Hashizume y col., 2025). El objetivo del estudio fue encontrar una forma precisa de eliminar una de las copias extra del cromosoma 21, sin dañar las otras dos, debido a que algunas regiones del cromosoma funcionan de forma diferente dependiendo de si provienen del padre o de la madre.

Para ello utilizaron células madre derivadas de una persona con síndrome de Down, determinaron cuáles copias del cromosoma 21 venían de cada progenitor y las denominaron M1 y M2 para las copias que venían de la madre y P para la copia del padre. Posteriormente diseñaron cortes específicos con CRISPR-Cas9 dirigidos únicamente a una de las copias maternas (la denominada M2), sin alterar la copia paterna.

Para dirigir el sistema solo a la copia M2, buscaron secuencias repetidas que fueran más comunes en esa copia y diseñaron 13 sitios de corte específicos, ya que cuantos más cortes existan, será más probable que la célula elimine el cromosoma. Asimismo, bloquearon algunos genes responsables de reparar el ADN, para evitar que la célula corrigiera los cortes en el cromosoma elegido, y facilitando entonces la eliminación de éste.

El método específico para modificar M2 fue eficiente y lograron eliminar la copia adicional del cromosoma en 37.5% de las células tratadas, que quedaron con un número normal de cromosomas, sin afectación de otros pares cromosómicos (Figura 3).

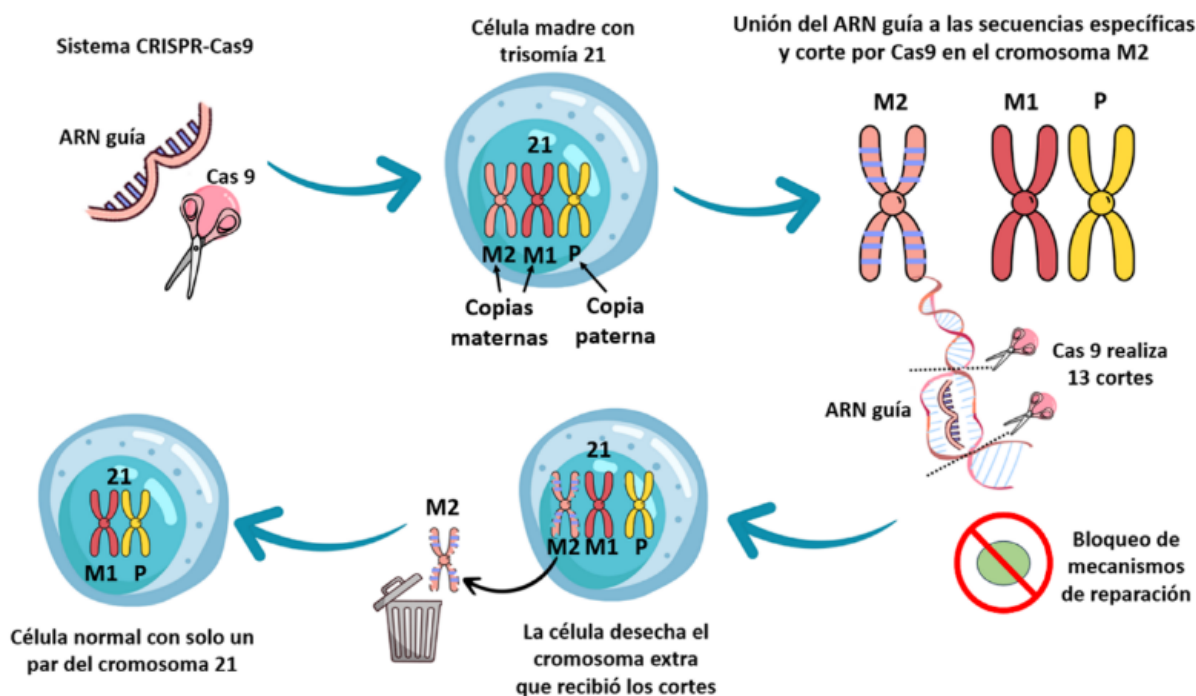


Figura 3: Edición genética con CRISPR-Cas9 en células madre con trisomía 21: Se diseñó un ARN guía específico para secuencias repetidas en la copia materna M2 del cromosoma 21, dirigiendo a Cas9 para que realizara 13 cortes. Al bloquear los mecanismos de reparación del ADN, se favoreció la eliminación de M2 al ser detectado como una secuencia dañada, logrando obtener células con un solo par del cromosoma 21. Imagen creada en Canva en base a los hallazgos de Hashizume y col., 2025.

Otro hallazgo importante del estudio de Hashizume y colegas es que su estrategia permitió eliminar eficazmente el cromosoma tanto en células madre pluripotentes (que pueden convertirse en casi cualquier tipo de célula del cuerpo), como en células ya diferenciadas, lo que resalta el amplio potencial clínico de esta herramienta para modificar condiciones asociadas a alteraciones en el número de cromosomas.

Avance científico y perspectivas

Si bien estos resultados representan un logro prometedor, hacia la posibilidad de poder corregir el síndrome de Down a nivel genético persisten desafíos técnicos. En primer lugar, este estudio

se realizó sobre células aisladas en condiciones de laboratorio, por lo que es necesario hacer ensayos en organismos completos, para valorar su eficiencia real. En segundo lugar, se deben considerar aspectos de seguridad, como evaluar efectos secundarios y valorar si existe daño en otros genes o consecuencias a largo plazo tras la edición genética. Finalmente, surgen cuestiones éticas relevantes sobre si es moralmente aceptable modificar genéticamente a un ser humano, aun cuando sea con fines terapéuticos. Por lo tanto, es indispensable profundizar en la investigación para minimizar los riesgos asociados a la edición genética y establecer marcos regulatorios que

aseguren un uso responsable. Sin embargo, a pesar de lo que aún falta por resolver, estos avances científicos son extraordinarios y abren la puerta a nuevas estrategias terapéuticas que podrían permitir intervenir incluso antes del nacimiento para la corrección de aspectos genéticos como la de las personas con síndrome de Down.

Referencias

- [1] Blanco-Montaña, A., Ramírez-Aguilar, M., Yáñez-Espinosa, B., Montaña-Sánchez, L., Ramírez-Cruz, A., Delgado-García, A., Martínez-Ramos, A., Martínez-Hernández, J., Aguilar-Sánchez, E., Aranda-Cortés, C. y Chávez-Castañeda, A., Risk factors in the origin of Down syndrome, *Rev. Med. Inst. Mex. Seguro Soc.*, 61[5], pp.6638–6644, 2023.
- [2] Chen, M., Mao, A., Xu, M., Weng, Q., Mao, J. y Ji, J., CRISPR-Cas9 for cancer therapy: Opportunities and challenges, *Cancer Lett.*, 447, pp.48–55, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2019.01.017>
- [3] Cleveland Clinic, Down Syndrome, Cleveland Clinic Health Library, <https://my.clevelandclinic.org/health/diseases/17818-down-syndrome>, 2023
- [4] Down Syndrome Achieves, Understanding the Three Different Types of Down Syndrome, Down Syndrome Achieves, <https://dsachieves.org/2024/04/19/understanding-the-three-different-types-of-down-syndrome/#About\%20Us\%20N>, 2024.
- [5] Hashizume, R., Wakita, S., Sawada, H., Takebayashi, S., Kitabatake, Y., Miyagawa, Y., Hirokawa, Y.S., Imai, H. y Kurahashi, H., Trisomic rescue via allele-specific multiple chromosome cleavage using CRISPR-Cas9 in trisomy 21 cells, *PNAS Nexus*, 4[2], 2025. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgaf022>
- [6] National Institute of Child Health and Human Development (NICHD), ¿Qué causa el síndrome de Down?, NICHD Español, <https://espanol.nichd.nih.gov/salud/temas/down/informacion/causas>, 2012.

Análisis general de un estudio de riesgo geodinámico (caso meteorológico, volcán Popocatepetl y Sierra Norte) en el estado de Puebla, México.

Dr. Rogelio Ramos Aguilar

Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México

Mtra. Patricia Máximo Romero

Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México

Mtro. Máximo Ávila Cruz

Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México

Mtro. Víctor Galindo López

Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México

Pasante Perla Cano Maceda

Colegio de ingeniería Topográfica y Geodesia de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Pasante Perla Yoselyne Valencia Fuentes

Colegio de ingeniería Topográfica y Geodesia de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Pasante Jessica Azucena Mejía Hernández

Colegio de ingeniería Topográfica y Geodesia de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Estudiante Mayumi López López

Universidad Autónoma de Guerrero

Estudiante Juan Pablo Velazquez Aparicio

Universidad Autónoma de Guerrero

Abstract

This work addresses the analysis of natural hazards in the region of Puebla, Mexico, focusing on three key areas: The Puebla-Tlaxcala metropolitan area, the Popocatepetl volcano and the Sierra Norte de Puebla. For the metropolitan area, a collection and analysis of meteorological data from open access national information is carried out, using modeling and interpolation software to represent climatic variables in different periods by means of Surfer mapping. As for the volcano, its dynamics, geochemical composition and the types of earthquakes that indicate possible expulsions of material are studied, in order to understand its evolution and mitigate risks associated with an eruption using 4 types of software, the first one Google Earth Pro, GPS Visualizer, Erupt and Surfer. Finally, in the Sierra Norte, slope stability is evaluated through a geostatistical study that considers gravity acceleration, distances and slopes to identify geological structures with potential risk of collapse. The information obtained was processed to generate risk maps to facilitate disaster planning and prevention in this region.

Keywords: analysis, risk, mapping, geostatistics, prevention.

Resumen

Este trabajo aborda el análisis de riesgos naturales en la región de Puebla, México, centrándose en tres áreas clave: la zona metropolitana Puebla-Tlaxcala, el volcán Popocatepetl y la Sierra Norte de Puebla. Para la zona metropolitana, se realiza una recopilación y análisis de datos meteorológicos a partir de información nacional de acceso libre, utilizando software de modelación e interpolación para representar las variables climáticas en diferentes

períodos mediante cartografía en Surfer. En cuanto al volcán, se estudia su dinámica, composición geoquímica y los tipos de sismos que indican posibles expulsiones de material, con el fin de comprender su evolución y mitigar riesgos asociados a una erupción utilizando 4 tipos de software, el primero Google Earth Pro, GPS Visualizer, Erupt y Surfer. Finalmente, en la Sierra Norte se evalúa la estabilidad de laderas mediante un estudio geoestadístico que considera la aceleración de la gravedad, distancias y pendientes para identificar estructuras geológicas con potencial riesgo de colapso. La información obtenida se procesó para generar mapas de riesgo que faciliten la planificación y prevención de desastres en esta región.

Palabras clave: análisis, riesgos, cartografía, geoestadística, prevención.

1. 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) 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.

Por otro lado, el volcán Popocatepetl 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 Sierra Norte de Puebla, región montañosa que se caracteriza por su geología y geomorfológica, con montañas escarpadas y valles profundos que la vuelven propensa a deslizamientos y colapsos de 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 geoestadístico que incluye variables como la aceleración de la gravedad, 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.

2. Caso zona metropolitana de Puebla-Tlaxcala

2.1 Zona de estudio

La zona metropolitana de Puebla-Tlaxcala está conformada por un total de 38 municipios (figura 1), siendo Puebla el núcleo principal y en torno al cual las demás ciudades funcionan, además de que es donde aproximadamente el 50% de la población de esta metrópoli se agrupa. 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.

Datos promedio			Primavera 2000-2010		Primavera 2010-2020		Primavera 2020-2024	
Estación	XUTM	YUTM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM
21248-PUEBLA (DGE)	582,552.81	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	19.57	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	2,113,756.48	17.56	38.08	17.19	49.37		
21247- CHOLULA	571,746.45	2,108,558.64	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	579,565.00	2,125,281.00	17.64	31.16	17.05	45.39	19.37	35.80
29050 - TEOLOCHOLCO	585,042.00	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

Tabla 1: Temperaturas y precipitación promedio en primavera. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

Datos promedio			Verano 2000-2010		Verano 2010-2020		Verano 2020-2024	
Estación	XUTM	YUTM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM
21248-PUEBLA (DGE)	582,552.81	2,103,685.66	19.85	124.16	19.36	162.18	19.08	159.58
21035-PUEBLA(DGE)	584,926.65	2,102,405.39	18.86	165.86	19.42	202.17	20.40	161.43
21065-PUEBLA(OBS)	587,684.43	2,106,567.99	18.37	124.16	18.59	162.18	19.56	159.58
29170- SAN PABLO DEL MONT	586,744.49	2,113,756.48	16.47	131.22	16.14	198.61		
21247- CHOLULA	571,746.45	2,108,558.64	18.08	190.85	18.43	184.82	19.14	157.10
21034- ECHEVERRIA	576,298.78	2,096,066.54	16.80	146.27	17.02	175.38	18.48	171.85
21249- AFRICAM ZAFARI	591,077.09	2,094,288.81	20.40	165.55	18.57	156.66	19.88	114.68
29169-ZACATELCO	579,565.00	2,125,281.00	16.64	161.09	16.37	188.38	18.04	185.12
29050 - TEOLOCHOLCO	585,042.00	2,127,950.00	16.94	150.61	17.01	183.91	17.60	315.26
29161 - ACXOTLA DEL MONTE	588,373.00	2,127,351.00	14.96	187.81	15.55	157.72	16.45	148.20
21242 - CAPULAC	598,941.00	2,111,389.00	16.88	146.12	17.21	173.91	20.18	263.63
21136 - ACAJETE	609,799.00	2,113,602.00	14.98	132.15	15.27	139.54	17.56	94.20

Tabla 2: Temperaturas y precipitación promedio en verano. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

Datos promedio			Otoño 2000-2010		Otoño 2010-2020		Otoño 2020-2024	
Estación	XUTM	YUTM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM
21248-PUEBLA (DGE)	582,552.81	2,103,685.66	18.80	68.47	18.73	82.57	18.36	58.38
21035-PUEBLA(DGE)	584,926.65	2,102,405.39	17.70	66.95	18.23	76.00	19.04	50.85
21065-PUEBLA(OBS)	587,684.43	2,106,567.99	17.17	68.47	17.35	82.57	17.96	58.38
29170- SAN PABLO DEL MONT	586,744.49	2,113,756.48	15.74	43.66	15.56	91.01		
21247- CHOLULA	571,746.45	2,108,558.64	16.95	36.10	18.05	94.45	17.50	66.06
21034- ECHEVERRIA	576,298.78	2,096,066.54	15.74	77.17	16.40	68.89	17.54	55.20
21249- AFRICAM ZAFARI	591,077.09	2,094,288.81	18.98	47.20	18.07	66.09	18.38	42.90
29169-ZACATELCO	579,565.00	2,125,281.00	16.07	64.98	16.25	71.78	17.18	80.54
29050 - TEOLOCHOLCO	585,042.00	2,127,950.00	15.55	70.30	15.80	75.16	15.95	65.61
29161 - ACXOTLA DEL MONTE	588,373.00	2,127,351.00	14.26	87.93	14.53	63.09	14.88	57.61
21242 - CAPULAC	598,941.00	2,111,389.00	15.28	111.28	16.06	75.98	16.84	165.74
21136 - ACAJETE	609,799.00	2,113,602.00	13.83	36.83	14.35	73.53	16.84	59.10

Tabla 3: Temperaturas y precipitación promedio en otoño. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

Datos promedio			Invierno		Invierno		Invierno	
			2000-2010		2010-2020		2020-2024	
Estación	XUTM	YUTM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM	TEM PROM	PREC PROM
21248-PUEBLA (DGE)	582,552.81	2,103,685.66	16.35	2.37	16.55	2.79	16.90	5.73
21035-PUEBLA(DGE)	584,926.65	2,102,405.39	14.18	1.16	15.41	3.54	15.90	6.38
21065-PUEBLA(OBS)	587,684.43	2,106,567.99	13.94	2.37	14.79	2.79	15.08	5.73
29170- SAN PABLO DEL MONT	586,744.49	2,113,756.48	12.69	1.82	13.45	8.30		
21247- CHOLULA	571,746.45	2,108,558.64	14.20	1.13	15.49	5.24	14.98	2.40
21034- ECHEVERRIA	576,298.78	2,096,066.54	12.06	0.68	15.01	4.19	14.68	5.76
21249- AFRICAM ZAFARI	591,077.09	2,094,288.81	16.55	1.65	15.81	4.28	15.83	5.50
29169-ZACATELCO	579,565.00	2,125,281.00	13.16	1.55	14.07	5.51	13.78	1.28
29050 - TEOLOCHOLCO	585,042.00	2,127,950.00	13.96	1.29	13.89	6.69	13.53	8.70
29161 - ACXOTLA DEL MONTE	588,373.00	2,127,351.00	11.94	2.22	12.13	4.86	12.90	4.25
21242 - CAPULAC	598,941.00	2,111,389.00	13.90	4.45	14.62	10.27	16.60	23.25
21136 - ACAJETE	609,799.00	2,113,602.00	9.53	1.75	12.75	3.43	14.15	9.08

Tabla 4: Temperaturas y precipitación promedio en invierno. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

Los datos promediados en las tablas corresponden a los meses representativos por cada estación del año, procesados en el software de Microsoft Excel, 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 2, realizada con el software Golden Surfer, muestra la comparativa para las variables de temperatura.

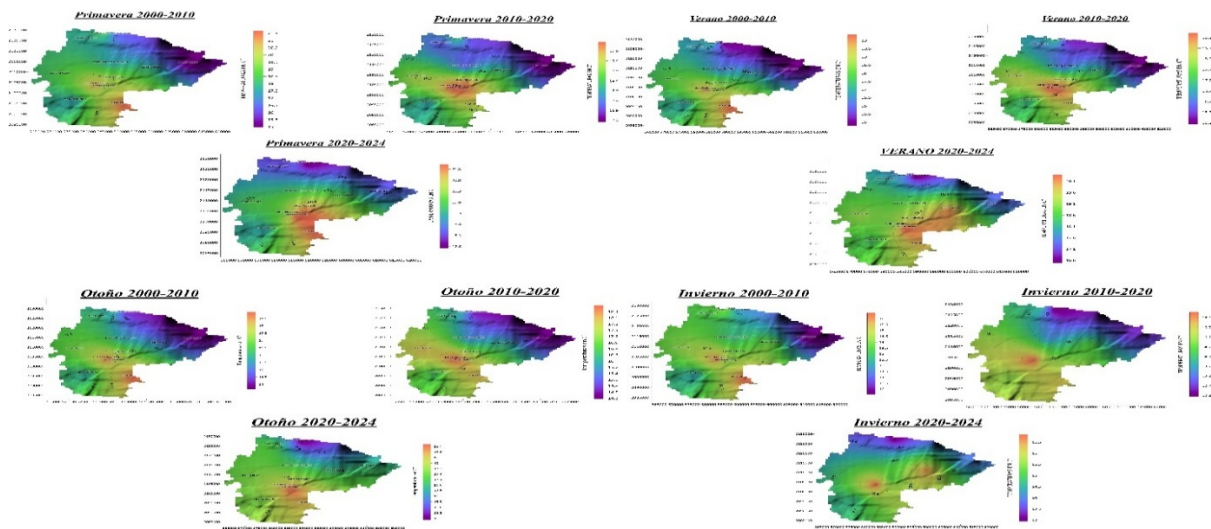


Figura 2: Modelos de temperaturas promedio. 2000-2024. Zona metropolitana de Puebla. Surfer 2023. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

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. 21249 mientras que las más bajas se dan en dirección a las localidades cercanas a la Malinche, como lo es la zona de estación no. 21136. 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 atmósfera. 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

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 2020-2024 respecto a 2000-2010. 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.

Para la variable de precipitación promedio, se crearon los siguientes modelos. (Figura 3)

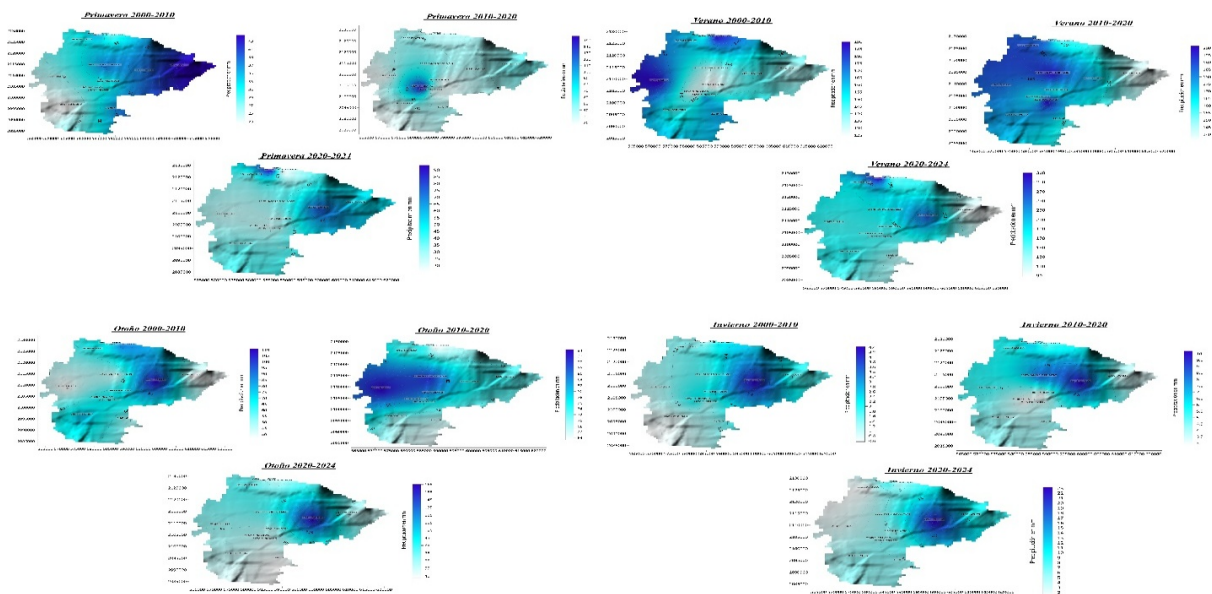
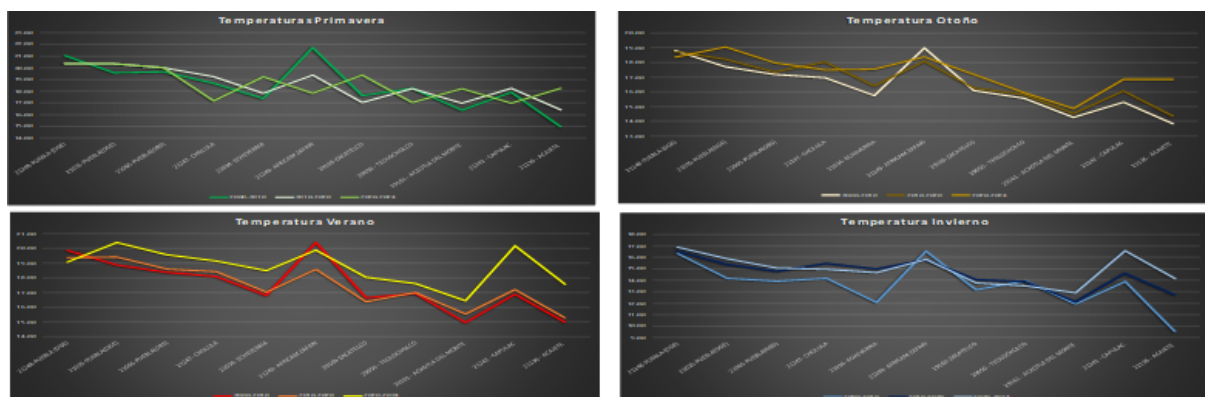


Figura 3: Modelos de precipitación promedio. 2000-2024. Zona metropolitana de Puebla. Surfer 2023. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

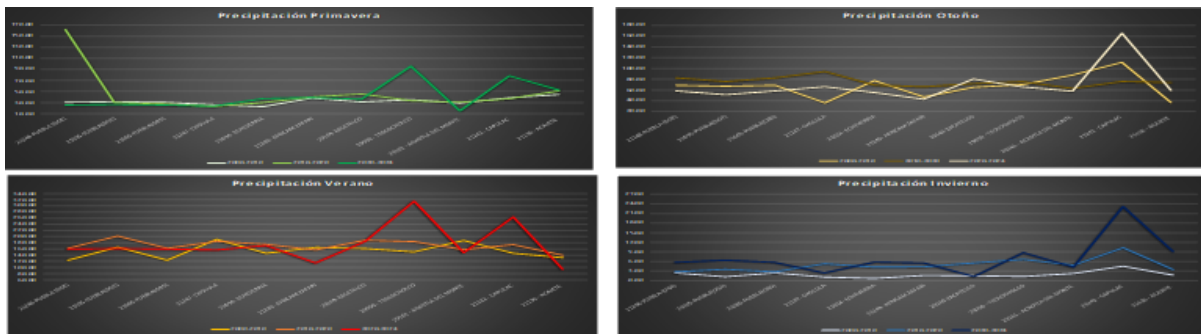
En los mapas de precipitación, el cambio es mucho más drástico por estación, especialmente en la temporada de verano en la que la precipitación aumenta. Pues se presentaron lluvias en promedio menores para verano del 2020-2024 con respecto al periodo de 2000-2010, siendo el caso contrario el de la temporada de invierno, donde no es común la presencia de lluvias mayores a 20 mm, caso que si se dio en el tercer periodo analizado. Esto, puede deberse especialmente a 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 como lo es Puebla.

Posteriormente, se generaron Gráficas para analizar a mayor profundidad el comportamiento tanto de temperatura como de precipitación. (Gráficas 1 y 2).



Gráfica 1: Temperaturas promedio. 2000-2024. Zona metropolitana de Puebla. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).



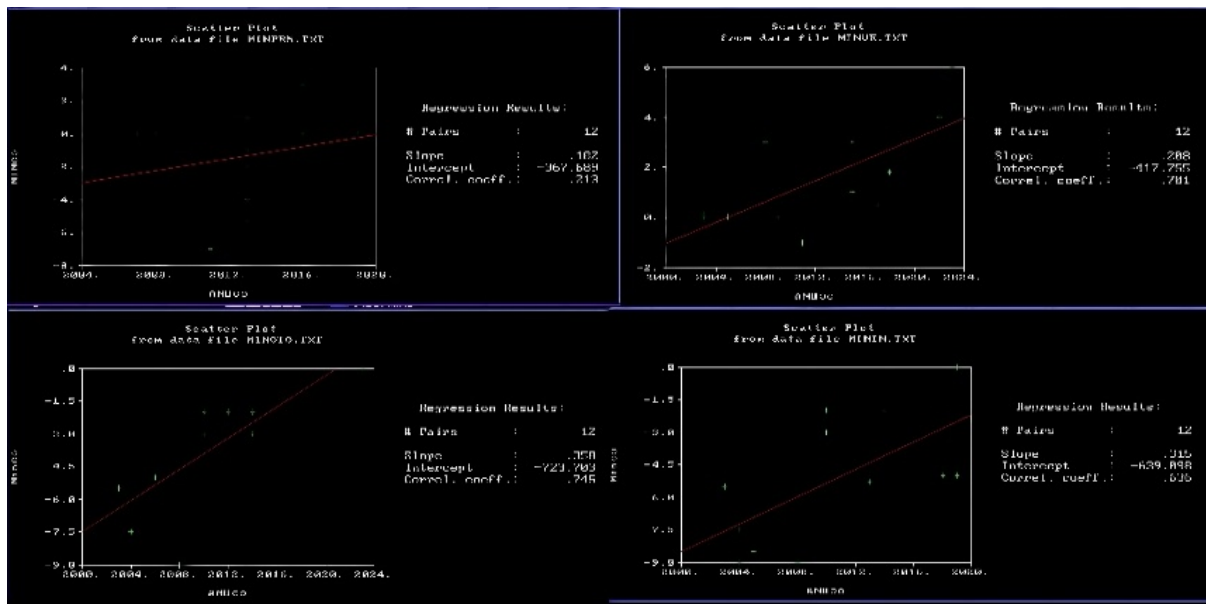
Gráfica 2: Precipitación promedio. 2000-2024. Zona metropolitana de Puebla. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

En los Gráficas, se aprecia que, en el caso de la variable de temperatura, un factor común es que la estación 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 de Capulac y 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, 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, si existe un aumento en las temperaturas promedios para todas las estaciones del año respecto al primer y segundo periodo de estudio.

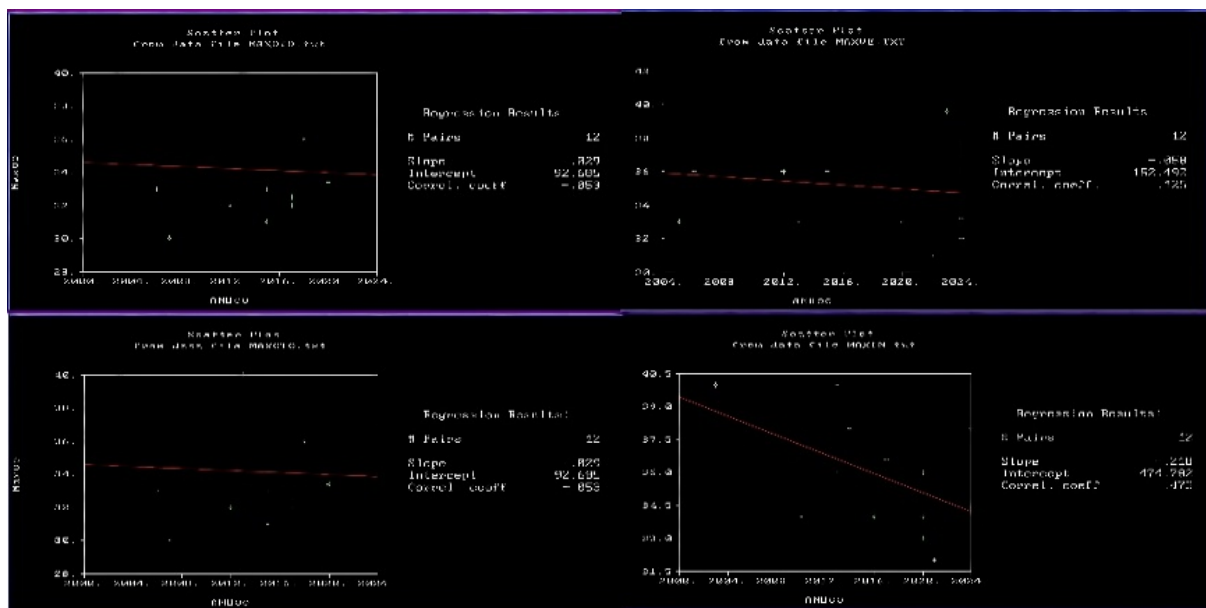
En el segundo Gráfica, vemos que en general, los periodos 2000-2010 y 2010-2020 se comportan de forma muy similar, dando concordancia en las lluvias que se presentaron en

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 Telocholco 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 obtenidas las gráficas, 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 en GEOEAS para la obtención de sus Gráficas de dispersión, analizando su comportamiento. El procedimiento se realizó en primera instancia con los datos de temperaturas.



Gráfica 3: Gráfica de dispersión para temperaturas mínimas 2000-2024. GEOEAS. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).



Gráfica 4: Gráfica de dispersión para temperaturas máximas 2000-2024. GEOEAS. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

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 Gráficas de dispersión para la temperatura, en los valores mínimos

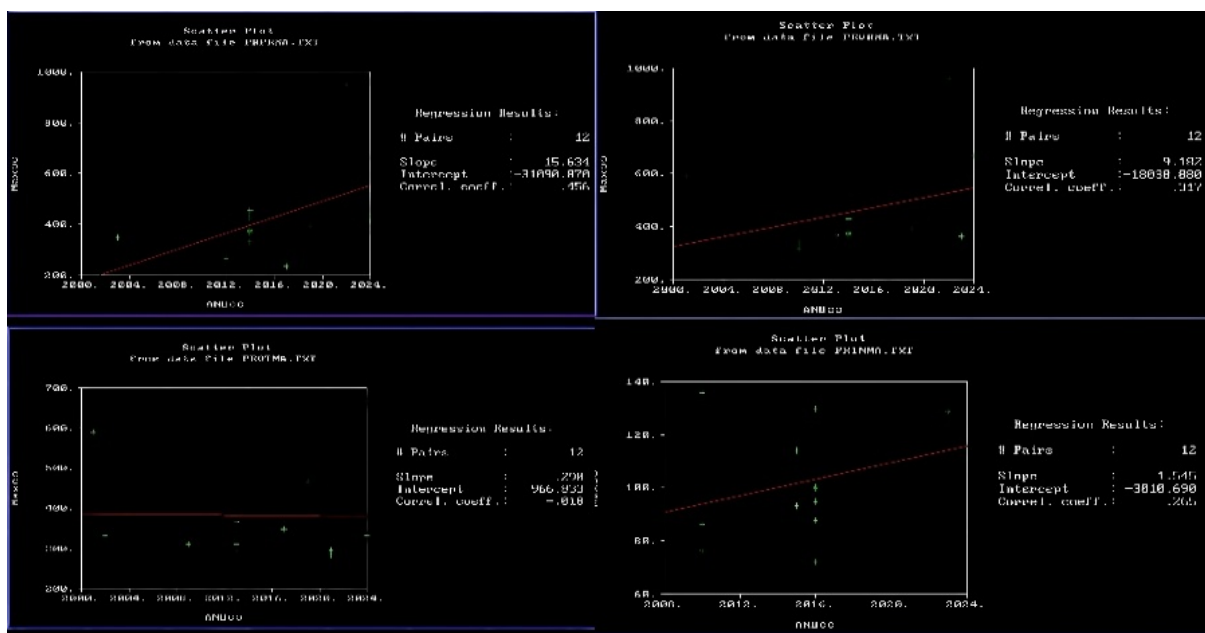
extremos se puede ver que la mayor proximidad a la tendencia de nuestra línea se da en aquellos valores cercanos a 0 °C, para primavera y verano, mostrando valores atípicos en los años 2011, siendo más bajo de lo normal, mientras que, en otoño e invierno, la tendencia se acerca a valores entre 5 °C y 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.

Para el caso de precipitación únicamente se generó el grafico de dispersión para los registros máximos extremos. (Gráfica 5).



Gráfica 5: Gráfica de dispersión para precipitación máximas 2000-2024. GEOEAS. Datos: SMN (2024), CONAGUA (2024).

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.

3. Caso Volcán Popocatepetl

El volcán Popocatepetl 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, (figura 4).

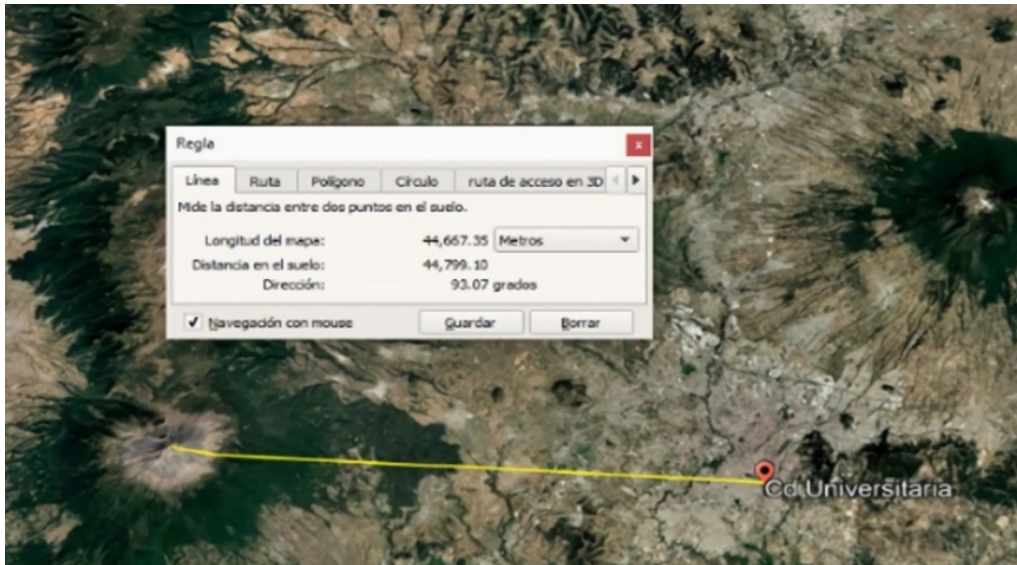


Figura 4: Determinación de distancia entre el cráter y ciudad universitaria Puebla. Fuente: Google Earth. (2024).

Aplicando el modelo matemático ideal siguiente:

$$t = \frac{d}{v} = 44,667,35 \text{ m} \quad (1)$$

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 Popocatepetl proporciona una oportunidad única para mejorar la comprensión dinámica interna, (figura 5).

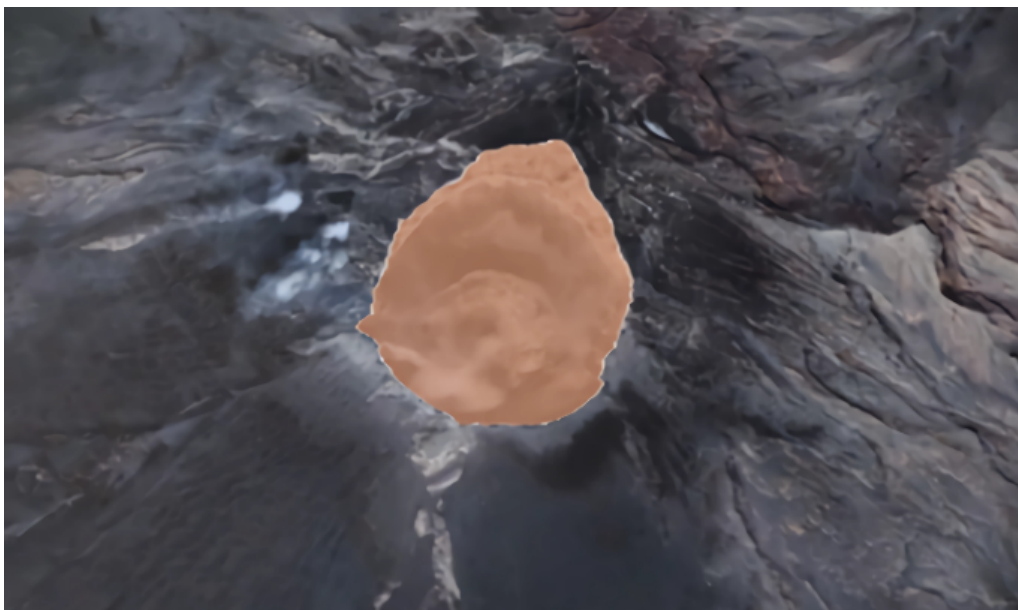


Figura 5: Determinación de distancia entre el cráter y ciudad universitaria Puebla Fuente: Google Earth. (2024).

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 6,7,8 y 9).



Figura 6: Área total de la base del volcán. Fuente: Google Earth. (2024).

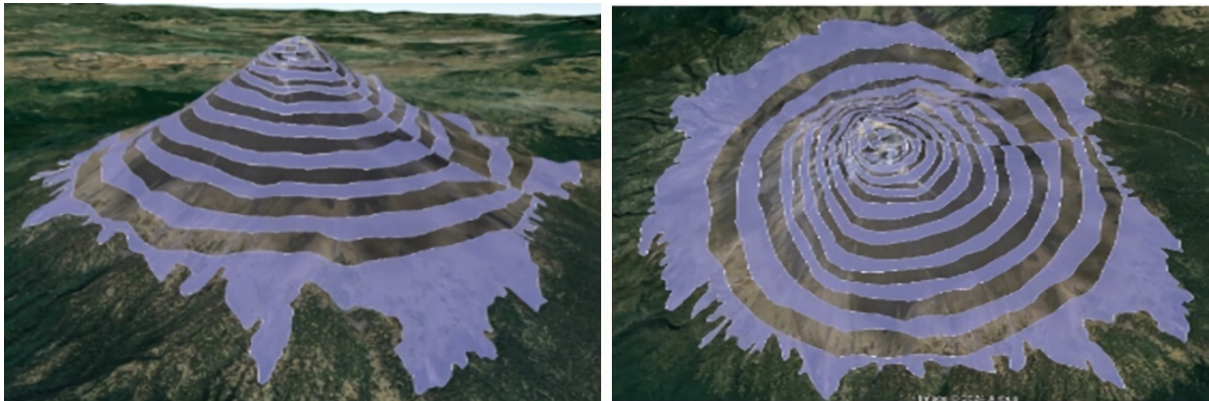


Figura 7: Estructura total del volcán, este tiene una forma de espiral desde el centro de nuestro cráter hasta su base. Fuente: Google Earth. (2024).

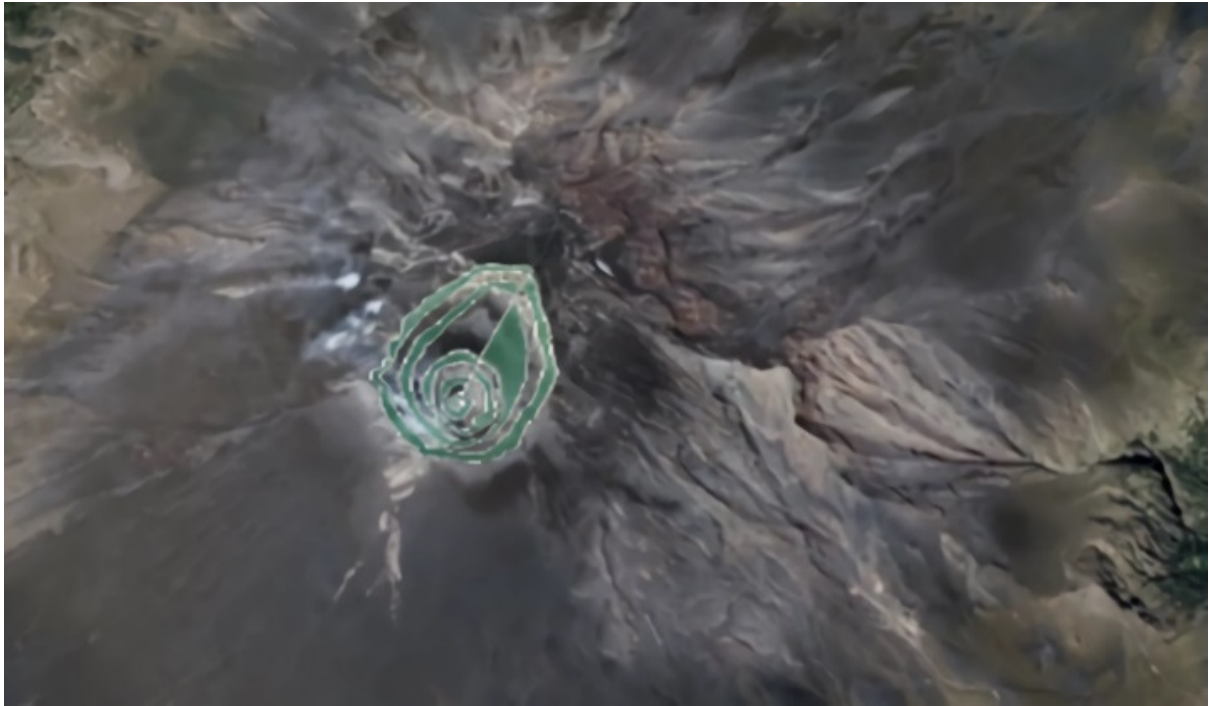


Figura 8: Estructura del edificio volcánico en forma de espiral Fuente: Google Earth. (2024).

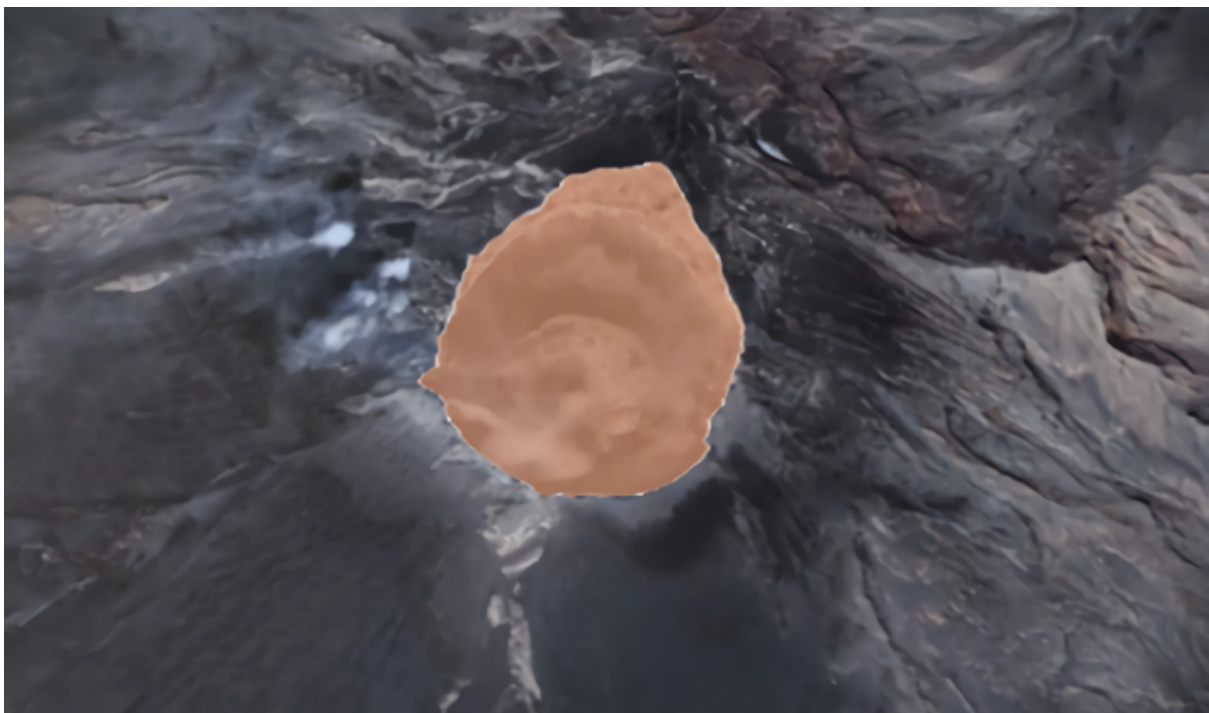


Figura 9: Estructura total edificio volcánico analizado. Fuente: Google Earth. (2024).

De igual forma se realizó en este mismo software el cálculo del área, perímetro y longitud del contorno de nuestro cráter dándonos los siguientes datos (figura 10 y 11):

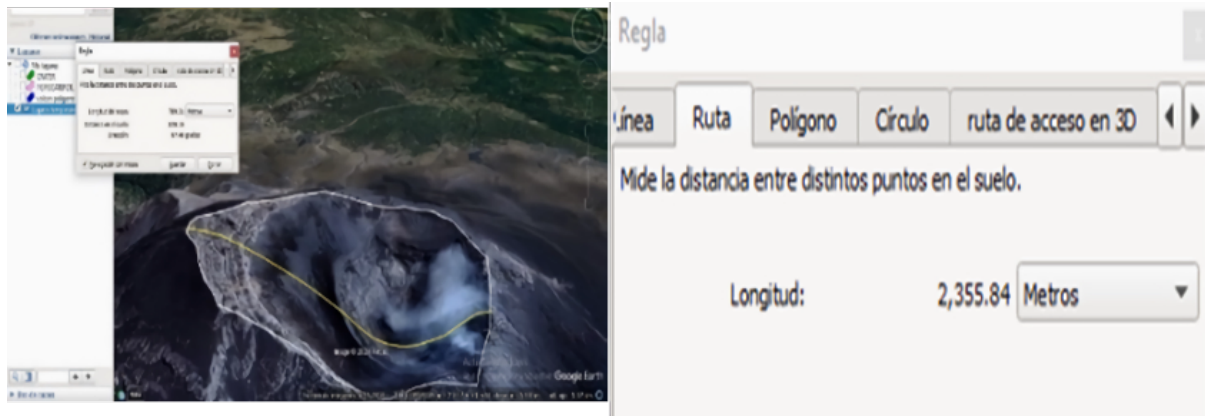


Figura 10: Dimensiones del edificio volcánico analizado, longitud: 2,355.84 metros. Fuente: Google Earth. (2024).

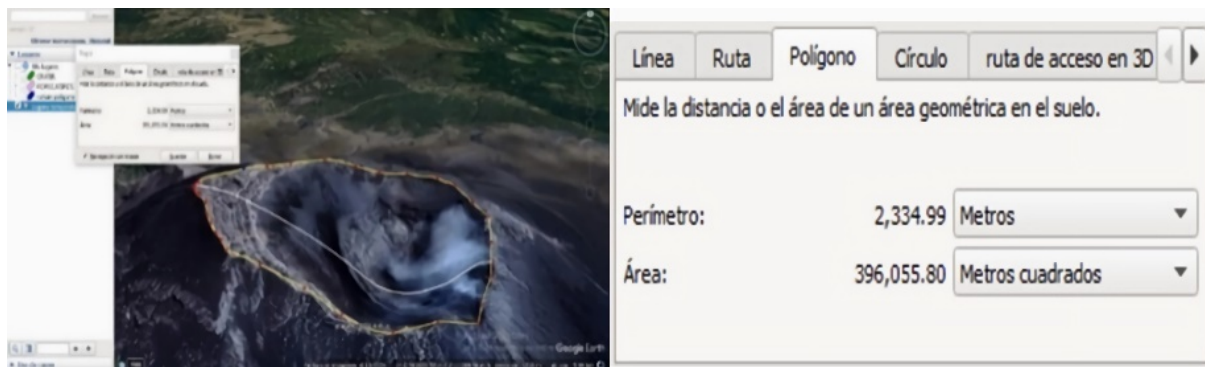


Figura 11: Dimensiones del cráter, área: 396,055.80m², perímetro: 2,334.99 m. Fuente: Google Earth. (2024).

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.

3.1 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, (figuras 12 y 13).

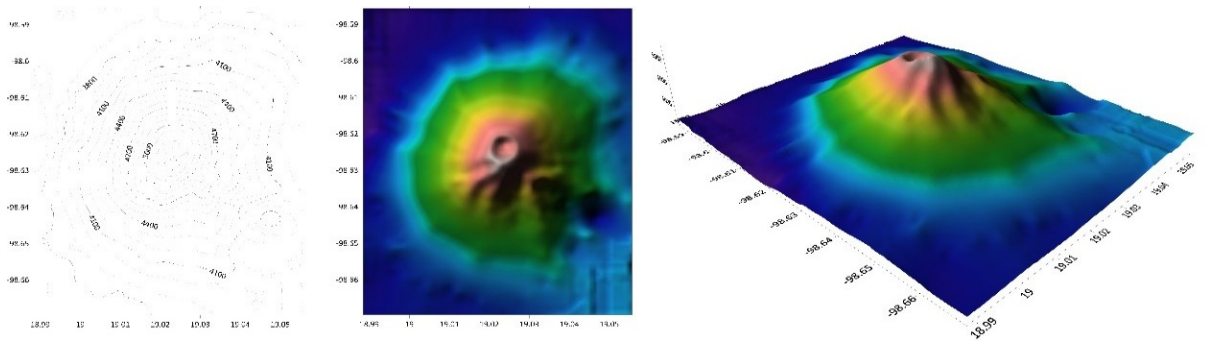


Figura 12: Representación tridimensional de la estructura del volcán. Surfer 2023. Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).

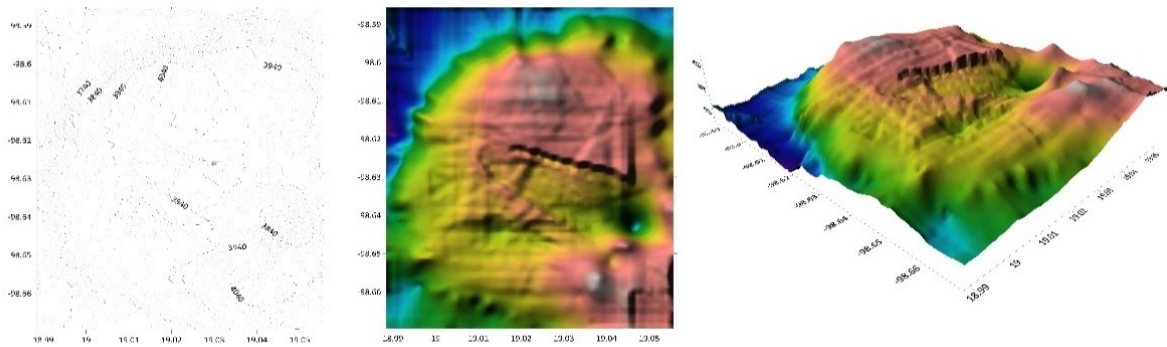


Figura 13: Representación tridimensional de la estructura del volcán. Surfer 2023. Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).

3.2 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, (figuras 14 y 15).

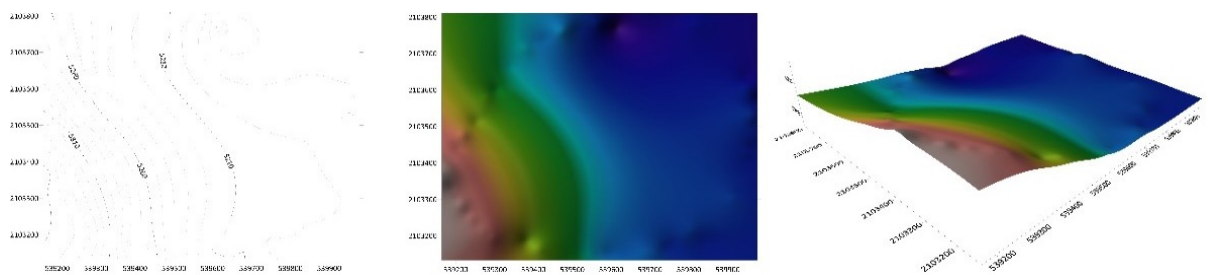


Figura 14: Representación tridimensional detallada de estructura del cráter. Surfer 2023. Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).

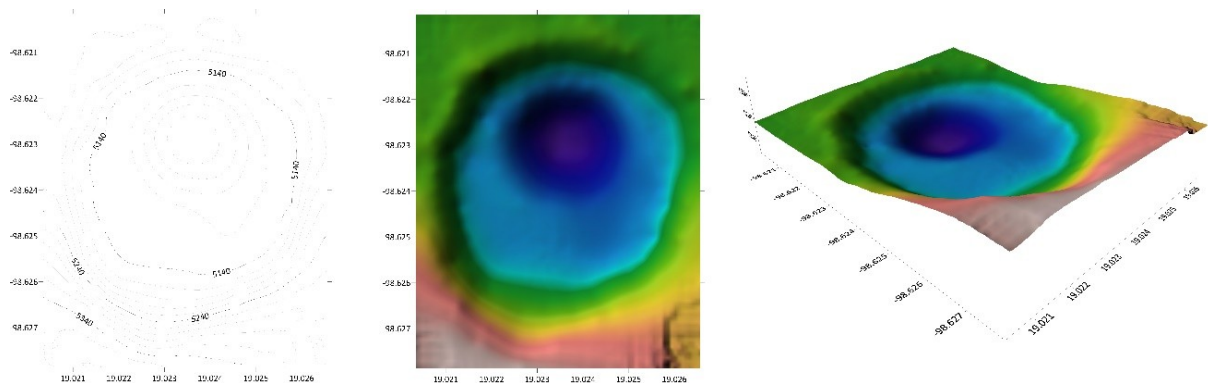


Figura 15: Representación tridimensional detallada de estructura del cráter. Surfer 2023. Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).

3.3 Perfiles de la Estructura del Volcán

Se realizó la obtención de perfiles en 3 distintos softwares, (figuras 16, 17 y 18) 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.

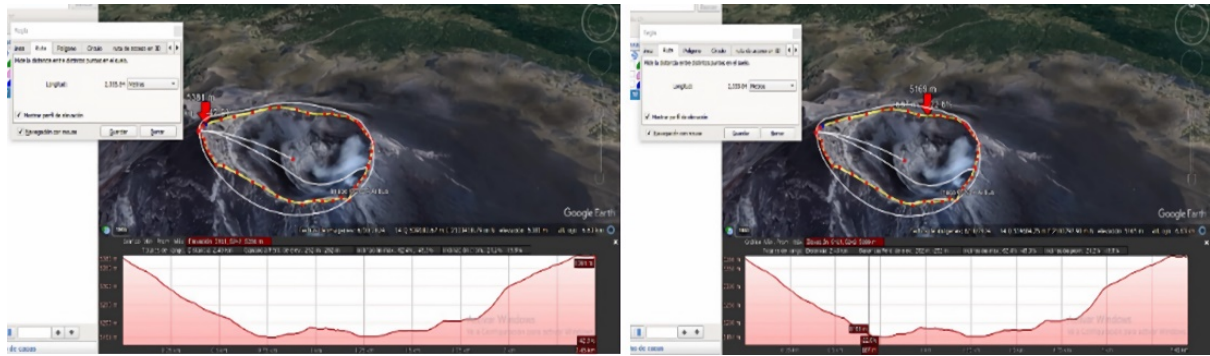


Figura 16: Análisis comparativo de perfiles. Google Earth (2024). Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).

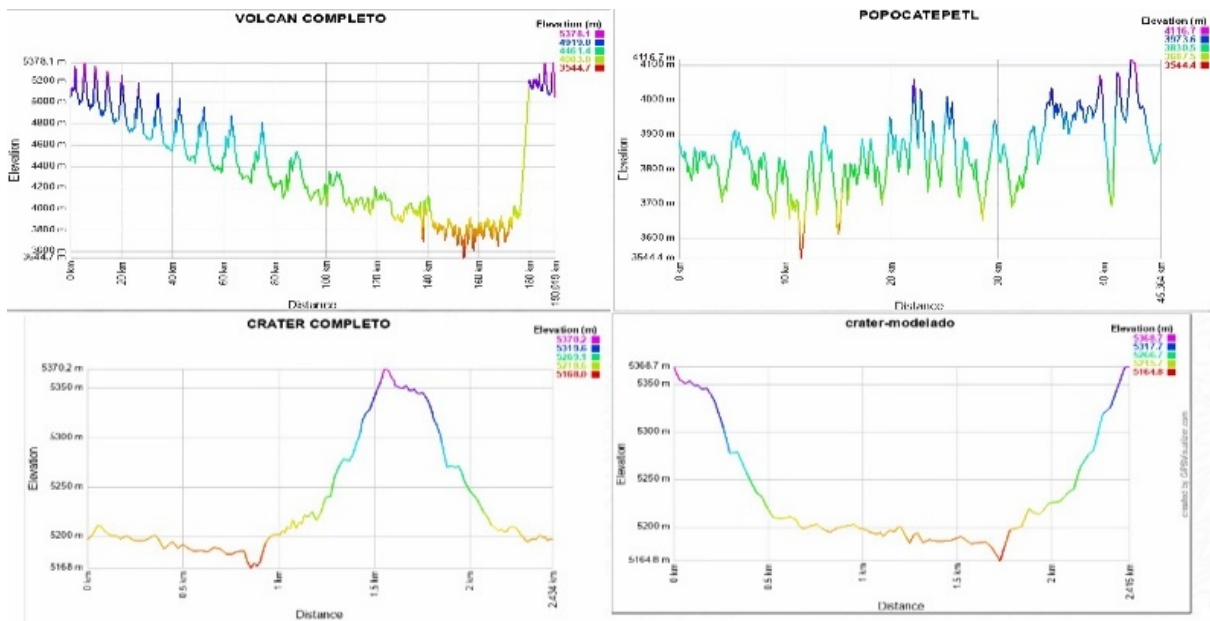


Figura 17: Análisis comparativo de perfiles. GPS Visualizer. Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).

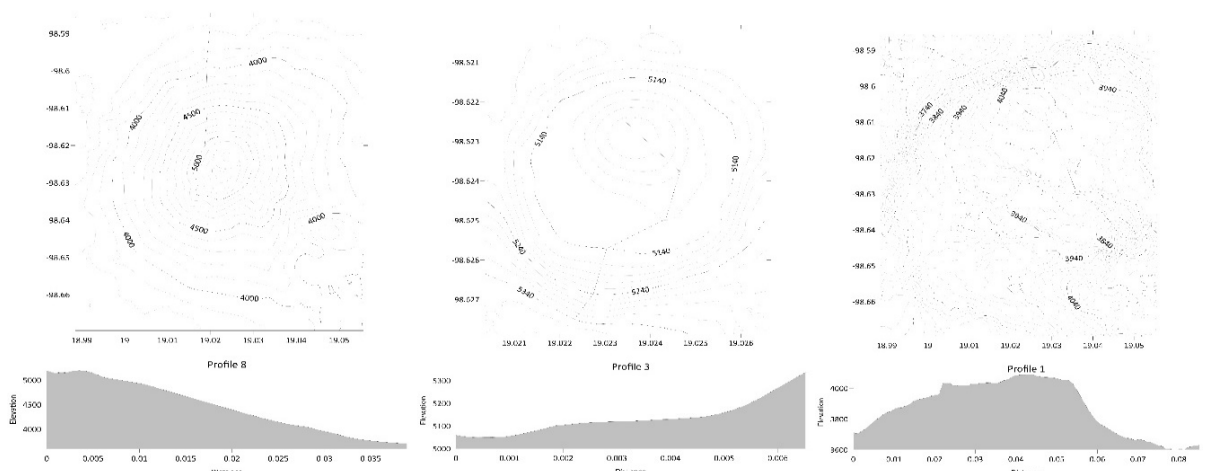


Figura 18: Análisis comparativo de perfiles Surfer (2023). Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).

3.4 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, una primera parte duro 135 minutos, pocas horas después, sería de 90 minutos.

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

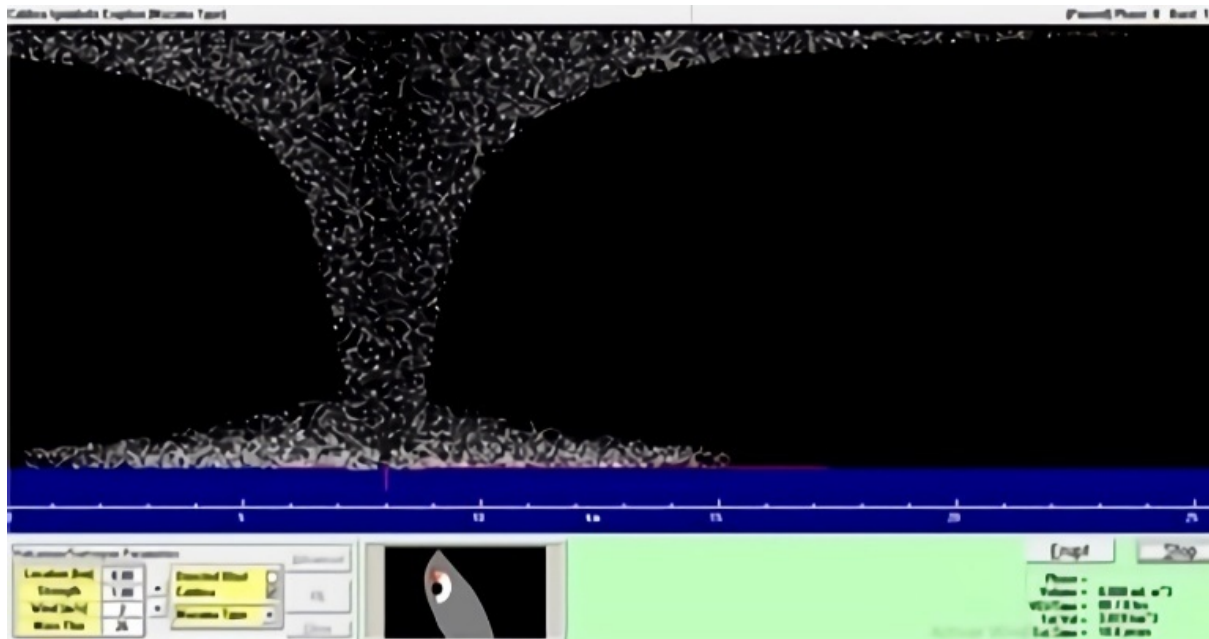


Figura 19: 11 de diciembre del 1994, El despertar del volcán Popocatépetl. Erupt. Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).

El 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.

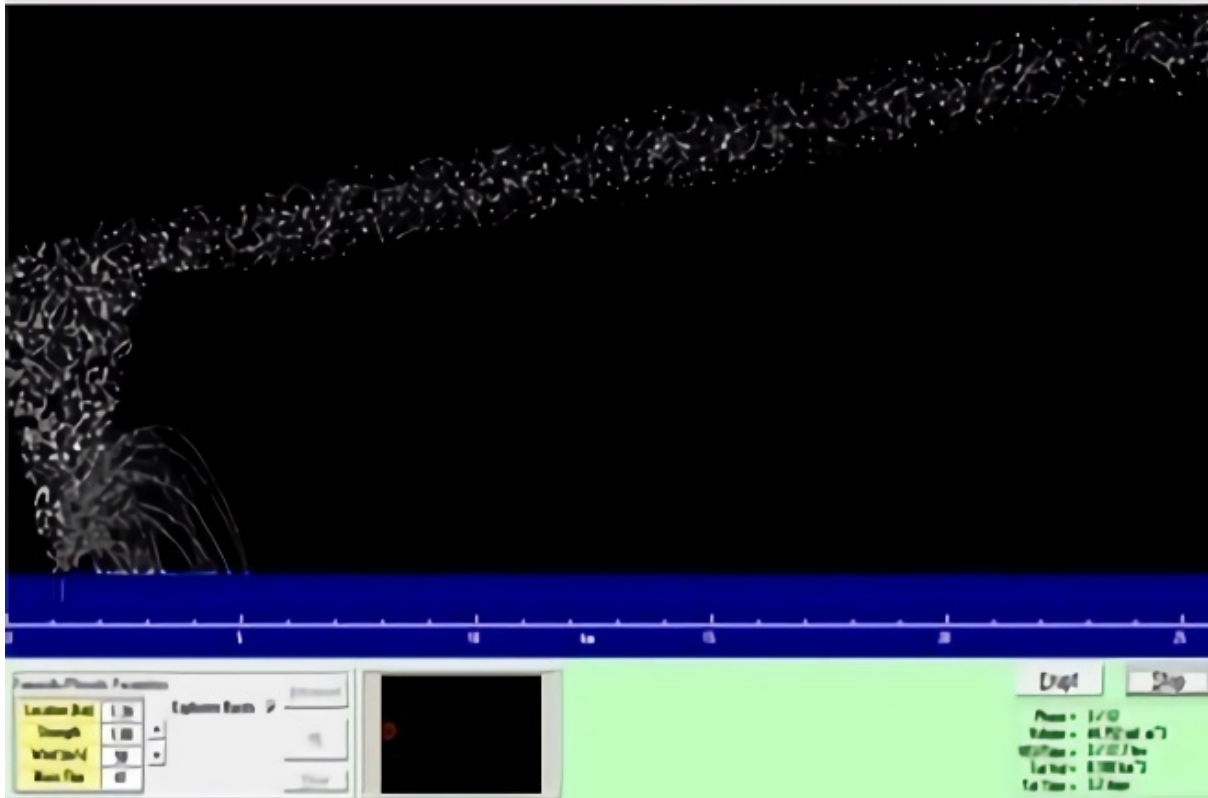


Figura 20: 19 de marzo de 2019, La erupción más violenta. Erupt. Datos: Global Mapper y google Earth (2024).

Los escenarios previstos para esta fase son:
 • 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 kilómetros.

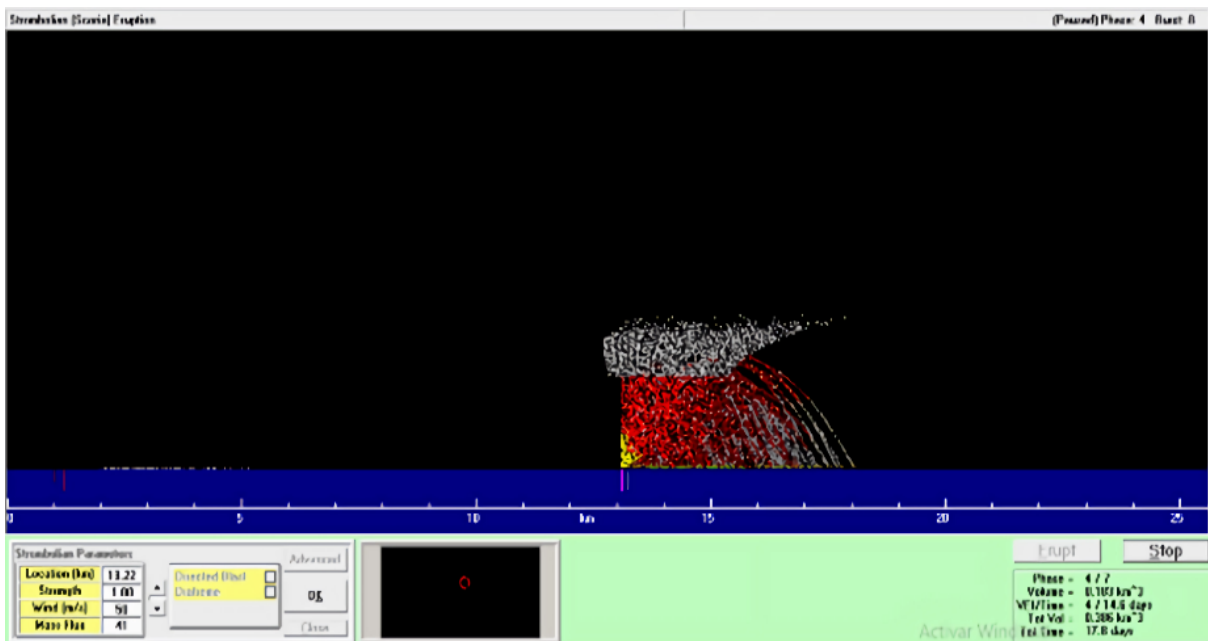


Figura 21: 7 de noviembre del 2024, última actividad. Erupt. Datos: Globap Mapper y google Earth (2024).

4. Caso Sierra Norte del Estado de Puebla

4.1 Zona de estudio Se identificó y delimitó la zona de estudio correspondiente a la Sierra Norte de Puebla; 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 geospaciales detallados en México.

El perímetro trazado fue transferido al software libre Google Earth, (figura 22), 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 la Sierra Norte.

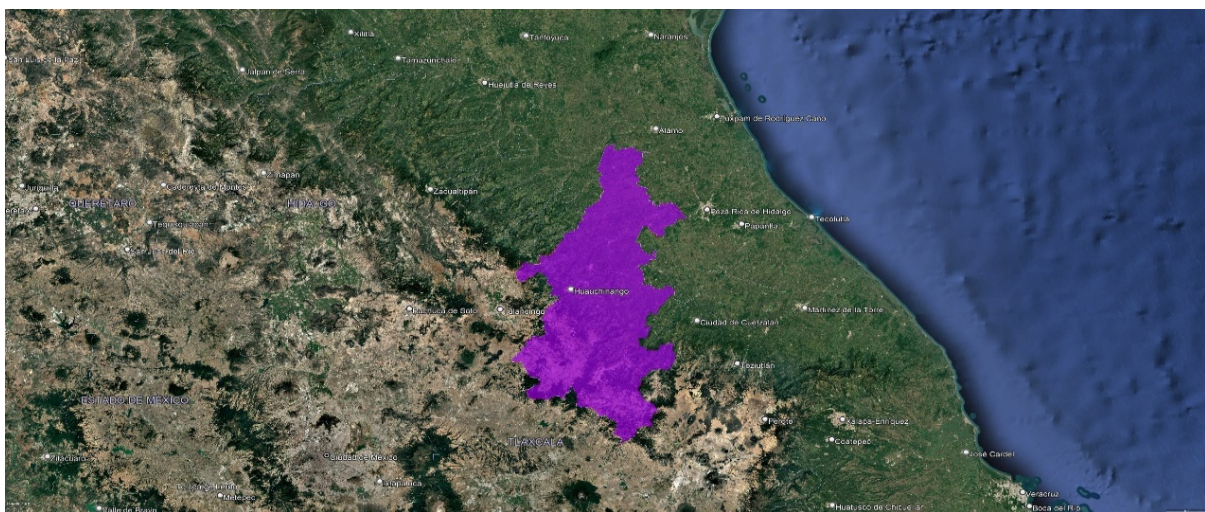


Figura 22: Ubicación de la zona de estudios "Sierra Norte del Estado de Puebla". Fuente: Google Earth (2024)

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 (tabla 5). 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.

No.	Latitud	Longitud	Altura	No.	Latitud	Longitud	Altura
1	20.839896	-97.842173	75.904739	38	20.5723	-97.92721	187.655487
2	20.839448	-97.84583	85.204384	39	20.569231	-97.932693	211.438171
3	20.836481	-97.849213	91.458725	40	20.567578	-97.935077	206.981979
4	20.832994	-97.852438	91.020203	41	20.569446	-97.93659	217
5	20.835089	-97.858913	80.212822	42	20.566668	-97.939378	219.751785
6	20.832784	-97.868089	88.62014	43	20.562139	-97.943965	351.50058
7	20.831122	-97.870639	88.67437	44	20.552482	-97.962971	556.677429
8	20.834059	-97.87896	189.960754	45	20.54533	-97.973733	449.497253
9	20.799277	-97.894239	150.355774	46	20.540644	-97.980298	506.007538
10	20.717234	-97.921772	308.866974	47	20.525862	-97.981543	345.362976
11	20.703008	-97.898071	119	48	20.523302	-97.97258	474.099976
12	20.696115	-97.903187	117.84375	49	20.514841	-97.979178	551.049988
13	20.689913	-97.912405	117.720222	50	20.516932	-97.984979	350.988892
14	20.671279	-97.917888	139.120148	51	20.515423	-97.986688	358.088776
15	20.665177	-97.908168	166.904617	52	20.514155	-97.990566	406.956177
16	20.654007	-97.91202	183.666199	53	20.510665	-97.992032	418.522675
17	20.650019	-97.908606	160.701599	54	20.507602	-97.992899	435.323883
18	20.644672	-97.907645	176.150955	55	20.505423	-97.997209	583.783447

Tabla 5: Coordenadas geográficas. Datos: Global mapper (2024). Parte 1

19	20.640917	-97.901657	155.558472	56	20.503241	-97.995882	600.453186
20	20.62391	-97.894755	157.50914	57	20.502539	-97.993363	592.341858
21	20.609356	-97.905103	171.499374	58	20.499963	-97.993021	470.72818
22	20.608155	-97.908682	157.692337	59	20.498147	-97.991065	346.350342
23	20.605326	-97.90564	165.911041	60	20.497877	-97.990004	303.846588
24	20.603507	-97.906552	149.153717	61	20.497296	-97.989825	291.596771
25	20.599935	-97.906093	161.277878	62	20.496461	-97.989632	289.291931
26	20.593981	-97.908347	185.96933	63	20.495428	-97.988818	285.722412
27	20.593271	-97.910871	161.851456	64	20.494532	-97.990067	286.106049
28	20.589843	-97.910704	162.773636	65	20.492785	-97.991921	293.769714
29	20.588028	-97.909538	168.667877	66	20.485099	-97.99333	351.456573
30	20.586307	-97.909742	181.986404	67	20.485698	-97.995333	305.371796
31	20.587106	-97.912317	172.354126	68	20.486993	-97.999325	311.301575
32	20.586413	-97.914807	178.131546	69	20.484518	-97.998061	313.658539
33	20.581892	-97.918023	184.262848	70	20.482653	-97.999841	313.087036
34	20.579505	-97.921341	190.535568	71	20.483092	-98.000837	321.880432
35	20.577381	-97.922942	190.527023	72	20.482706	-98.001765	308.848907
36	20.575063	-97.923774	186.350739	73	20.482669	-98.006321	321.64447
37	20.573161	-97.927709	196.89856	74	20.482715	-98.008763	321.221466

Tabla 6: Coordenadas geográficas. Datos: Global mapper (2024). Parte 2

4.2 Cálculo de la aceleración de la gravedad en la latitud

La aceleración de la gravedad es el efecto de la atracción universal que impulsa a los cuerpos hacia el centro de la Tierra, siendo la fuerza que determina su peso. Representada por la letra g , la aceleración de la gravedad se define como el aumento constante de la velocidad en una unidad de tiempo, experimentado por un cuerpo en caída libre, y es inversamente proporcional a la masa m_0 del cuerpo en kilogramos (kg), dada por la fórmula: $g = f/m_0$. (2) (Capra. s.f.)

Para llevar a cabo el análisis de la aceleración de la gravedad en la Sierra

$$(\varphi) = 978032.7 (1 + 0.00527904 \sin^2 \varphi + 0.00002327 \sin 4\varphi + 0.00000012 \sin 6\varphi) mGal \quad (3)$$

$$(\varphi) = 9.780318 (1 + 0.0053024 \sin^2 \varphi - 0.0000058 \sin^2 2\varphi) - 3.086 * 10^{-6} * H [m/s^2] \quad (4)$$

Con los resultados obtenidos, podemos interpretar la información y evaluar la estabilidad de las pendientes, considerando que la aceleración de la gravedad influye directamente en el comportamiento de los materiales y estructuras geológicas. Estos valores destacan los puntos máximos y mínimos, así como sus ubicaciones específicas. La zona que abarca los puntos de 320 a 500 consecutivamente, cubriendo los municipios de Chignahuapan, Ixtacamaxtitlán y Aquixtla, presenta valores mínimos en los puntos más altos debido a que la gravedad es mínima en donde hay mayor elevación. Por otro lado, los valores máximos se encuentran entre los puntos 63 y 590 en los puntos más bajos debido a que la gravedad es mayor en puntos más bajos por la atracción de la tierra, cubriendo los municipios de Francisco Z. Mena, Pantepec, Venustiano Carranza y Jalpan, en una distribución de izquierda a derecha en retroceso.

Norte de Puebla, se emplearon dos fórmulas: la de gravedad teórica o normal Internacional del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (fórmula 3) y la de gravedad local INEGI (fórmula 4). Ambas se aplicaron en cada uno de los 770 puntos, con el propósito de correlacionar los resultados de los datos obtenidos. Estos datos permiten no solo calcular la aceleración de la gravedad en función de la posición geográfica y la elevación de cada punto, sino también analizar los modelos matemáticos en la representación de la realidad física de la zona de estudio, utilizando los siguientes modelos matemáticos.

4.3 Análisis geoestadístico

Con los valores de gravedad obtenidos en cada punto de la zona de estudio, se llevaron a cabo análisis geoestadísticos utilizando modelos matemáticos como la desviación estándar, el coeficiente de correlación, la covarianza y el coeficiente de variación.

La desviación estándar (fórmula 5) es una medida de dispersión en estadística descriptiva que permite evaluar cuánto se desvían los datos individuales respecto a la media. Una desviación estándar baja sugiere que los datos están cercanos a la media, mientras que un alta indica una mayor dispersión de valores.

La covarianza (fórmula 6) permite determinar si dos variables tienden a variar de manera conjunta, y en este caso se utilizó para analizar la relación entre la gravedad y la cantidad total de puntos muestreados. El coeficiente de variación (fórmula 7) ayuda a medir

la dispersión relativa de los datos en torno a un punto central, generalmente la media.

Por último, el coeficiente de correlación (fórmula 8) es una herramienta

estadística que mide el grado de asociación lineal entre dos variables, proporcionando información sobre la dirección y fuerza de la relación entre la gravedad y la altitud en este caso.

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X-\bar{X})^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$Cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n} \quad (6)$$

$$cv = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (7)$$

$$\rho = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (8)$$

Al concluir el análisis geoestadístico se obtuvieron los siguientes resultados de cada uno de los modelos matemáticos llevados a cabo (figura 23). El valor de los resultados de la desviación estándar indica que tanto la altura como la gravedad teórica presentan una mayor dispersión de valores, mientras que la gravedad local mantiene una desviación baja, lo que sugiere que sus datos están próximos a la media.

relación entre los valores de altura, tanto para la gravedad teórica como para la gravedad local entre los 770 puntos. Esto representa la evaluación de cómo estas variables pueden cambiar conjuntamente en el área de estudio. Respecto al coeficiente de correlación, este se aproxima a -1 tanto para la gravedad local como para la teórica, lo cual indica una correlación fuerte e inversa entre las variables de gravedad (teórica y local) y la altura.

El análisis de la covarianza revela la

FORMULAS		RESULTADOS	
Desviación estandar	$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n - 1}}$	ALTURA	1102.334217940960
		GRAVEDAD TEORICA	20.428181593504
		GRAVEDAD LOCAL	0.003581053486
Covarianza	$Cov(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n}$	ALTURA Y GRAVEDAD T	-19645.545558273500
		ALTURA Y GRAVEDAD L	-3.940880150859
		ALTURA Y GRAVEDAD T	-0.872410924367
Coeficiente de correlación	$\rho = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$	ALTURA Y GRAVEDAD L	-0.998318527521
		ALTURA	0.890083096351
Coeficiente de variación	$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}}$	GRAVEDAD TEORICA	0.00002087
		GRAVEDAD LOCAL	0.000366061

Figura 23: Resultados del análisis geoestadístico. Datos: Global mapper (2024).

4.4 Cálculo de la aceleración de la gravedad en la latitud

Las distancias se calcularon entre dos puntos específicos, siendo esto esencial para los cálculos de pendiente, ya que dependen de la relación entre la elevación y la distancia horizontal entre los puntos. Para obtener estas mediciones, se aplicó la fórmula correspondiente (fórmula 9) usando coordenadas UTM (Guzmán, J. H. 2022). La pendiente, que mide la inclinación de una superficie, se define como la

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (9)$$

$$\text{Pendiente} = \frac{\text{Diferencia de alturas}}{\text{Distancia horizontal}} * 100 \quad (10)$$

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

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 (fórmula 10) y es fundamental para evaluar el riesgo de colapso en estructuras.

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.

4.5 Modelación en el software de uso libre Surfer.

Modelación en 2D y 3D de la zona de estudio para representación del terreno. (Figura 24)

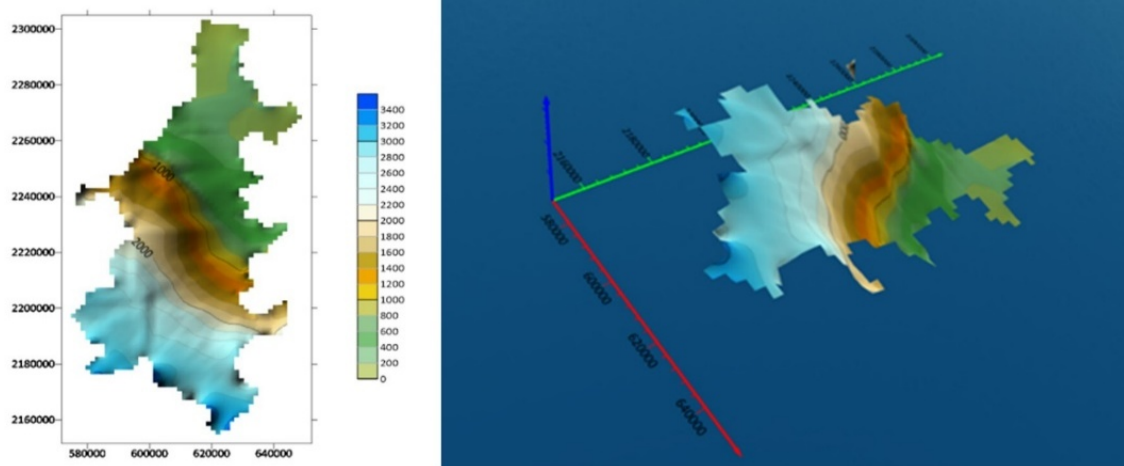


Figura 24: Modelo de la Sierra Norte en 2D y 3D. Surfer 2023. Datos: Global mapper (2024)

En los modelos de gravedad local y teórica (figura 25), se observa que los puntos de mayor altitud corresponden a valores de gravedad más bajos, mientras que los valores de gravedad más altos se encuentran en las zonas

más bajas. Esto indica que las áreas de mayor altitud incluyen los municipios de Chignahuapan, Ixtacamaxtitlán y Aquixtla.

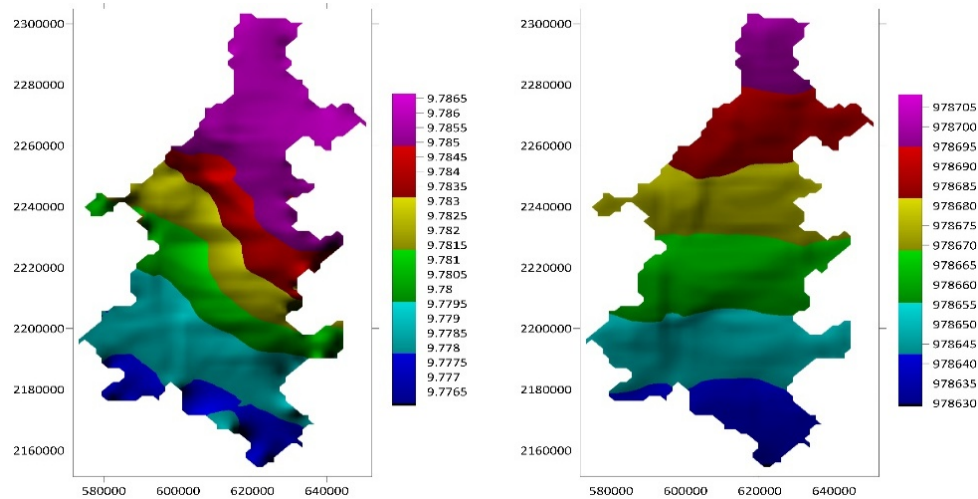


Figura 25: Modelo de la gravedad local y teórica. Surfer 2023. Datos: Global mapper (2024).

En los modelos de cálculo de distancias (figura 26) punto a punto, se observa que las zonas con distancias más cortas corresponden a puntos más próximos entre sí. En el modelo de pendiente (figura 26), 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.

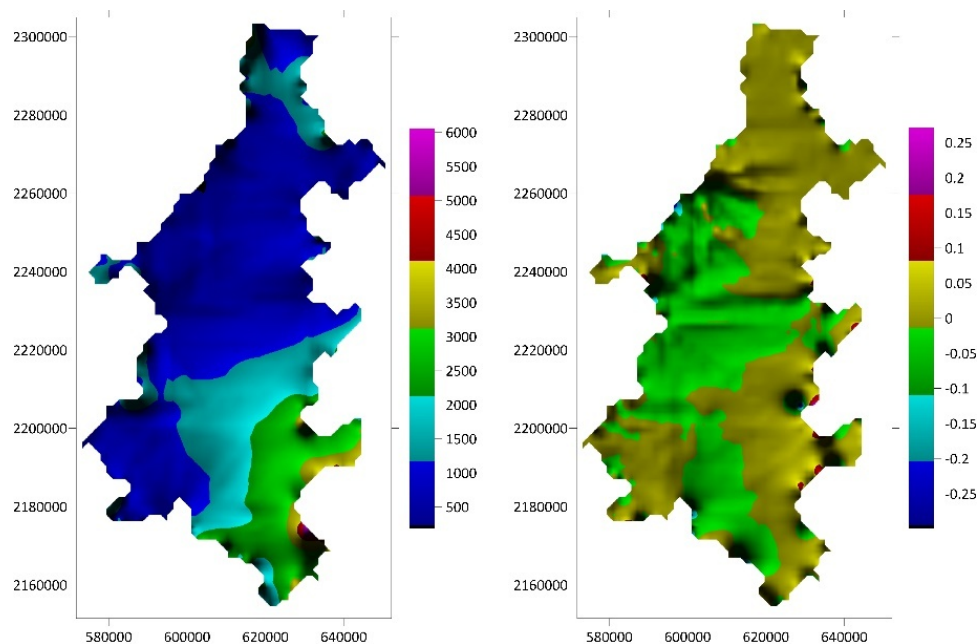


Figura 26: Modelo de la gravedad local y teórica. Surfer 2023. Datos: Global mapper (2024).

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 Sierra Norte de Puebla, 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.

5. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en la investigación destacan la interacción entre factores climáticos, geológicos y antrópicos, subrayando los riesgos ambientales 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 ámbito geoestadístico, 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 Popocatepetl 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.

6. Conclusión

El trabajo integra principalmente el análisis del cambio climático en la zona metropolitana de Puebla, mostrando los efectos adversos del 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", ha impactado las temperaturas y patrones de precipitación. Además, la deforestación en áreas circundantes contribuye al aumento de la temperatura y altera el ciclo hídrico.

Por otra parte, la clasificación y análisis estadísticos de los sismos volcánicos que se realizaron son fundamentales para entender la dinámica del volcán y predecir posibles erupciones, el volcán Popocatepetl es uno de los volcanes más activos de México, al realizar los modelos eruptivos nos ayudan a comprender, entender y predecir la actividad volcánica en diferentes áreas de estudio.

Los análisis geoestadísticos reflejan una correlación inversa entre altura y

gravidad, evidenciando que las áreas a mayor elevación presentan un mayor riesgo de inestabilidad en las pendientes, lo cual representa una amenaza para las comunidades locales. Las herramientas estadísticas aplicadas aportaron precisión al estudio, permitiendo una interpretación detallada de las condiciones de estabilidad del terreno. Así, esta investigación 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 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 ambiental 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 ambientales desde un enfoque multidisciplinario. Los resultados no solo contribuyen al entendimiento del 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.

Referencias

- [1] 5802-(3) Capra. s.f. "Boletín del Servicio Geológico Mexicano." <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/index.php/180-sitio/>

articulos/cuarta-epoca/5802/6588023capra:~=En%20la%20Sierra%20Norte%20de%20Puebla%20se%20tiene%20una%20situaciÃ³n,en%20sus%20partes%20mÃ¡s%20superficiales.

- [2] Atlas Nacional de Riesgos. s.f. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/inestabilidad-laderas.html>.
- [3] CENAPRED. 2024. Reporte del monitoreo del Cenapred. CENAPRED.
- [4] CONAPO. 2010. "Zona Metropolitana 34." http://conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/zonas_metropolitanas_2010/mapas/ZM34.pdf.
- [5] GEOEAS (Geographic and Environmental Analysis System). 1992. Versión 3.0. Departamento de Geografía de la Universidad de California.
- [6] Golden Software. 2023. Surfer. Versión 22.0. Golden Software.
- [7] Mapa Digital de México en línea. s.f. <https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF00jIzLjMyMDA4LGxvbjotMTAxLjUwMDAwLHo6MSxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dGMxMTFzZXJ2aWNpb3M=>.
- [8] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Vázquez García, M. de la C., Martínez Ortiz, A. G., Hernández Andrade, D., y Benítez Ramírez, D. M. (2020). Estudio cartográfico del volcán Popocatepetl, Puebla, México: volumen edificio volcánico, aceleración de la gravidad y zonas de riesgo para la población. *Contactos, Revista De Educación En Ciencias E Ingeniería*, (115), 37 - 52.

- [9] 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*.
- [10] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Narciso Hernández, J., Mirón Morales, M. y 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.
- [11] Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Soto Cruz, B., Alcántara Iniesta, S. y 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.

Microgeles: una revolución en la ingeniería biomédica

Dr. G. Sánchez Balderas

Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa
Department of Applied Physics, Faculty of Sciences, University of Granada

Dra. Sarita Montaña

Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Sinaloa

Dra. C.L. Moraila Martínez

Facultad de Biología, Universidad Autónoma de Sinaloa,

Dr. M. Bramini

Department of Cell Biology, Faculty of Sciences, University of Granada

Dra. P. Sánchez Moreno

Department of Applied Physics, Faculty of Sciences, University of Granada

Dr. M.A. Fernandez Rodriguez

Department of Applied Physics, Faculty of Sciences, University of Granada

Abstract

This outreach article provides an accessible overview of recent advances in gels, with a focus on microgels. Their physicochemical properties, classification, responsiveness to stimuli, and characterization techniques are highlighted. In addition, some promising biomedical applications are described, especially drug delivery, positioning microgels as a promising tool for the development of future nanotechnology and medicine.

Keywords: microgels, Langmuir trough, biomedical applications, biomolecules

Resumen

Este artículo divulgativo ofrece una visión general accesible de los últimos avances en el campo de los geles, con especial atención a los microgeles. Se destacan sus propiedades fisicoquímicas, su clasificación, su capacidad de respuesta a los estímulos y las técnicas de caracterización. Además, se describen algunas aplicaciones biomédicas prometedoras, especialmente la administración de fármacos, lo que posiciona a los microgeles como una herramienta prometedora para el desarrollo de la nanotecnología y la medicina del futuro.

Palabras clave: microgeles, balanza de Langmuir, aplicaciones biomédicas, biomoléculas

1. Introducción

Existen muchas sustancias en nuestro entorno diario que están formadas por pequeñas partículas, monómeros, que pasan de estar dispersas en un líquido a formar una red polimérica entrecruzada sólida, atrapando líquido en el proceso. Un ejemplo son las gelatinas que disfrutamos como postre, en las que el polímero está compuesto

de aminoácidos provenientes del colágeno, que al ser mezclado en agua caliente es líquido y gelifica formando una red tridimensional cuando se enfría, absorbiendo una gran cantidad de agua en su matriz polimérica, a la cual llamamos *gel*. Muchos gelificantes son usados en la industria alimentaria como espesantes, también en pinturas, adhesivos, fármacos, etc. En el caso de los microgeles, su pequeño tamaño y su sensibilidad a estímulos externos como la temperatura fisiológica han enfocado los estudios hacia su biocompatibilidad con sistemas biológicos, principalmente para uso en la industria farmacéutica como vehículos para la liberación de fármacos. Este artículo ofrece una visión general sobre geles y microgeles, describiendo sus propiedades fundamentales, métodos de síntesis y caracterización, así como sus principales aplicaciones en biomedicina. Además, discutimos sobre las tecnologías emergentes que impulsan su uso en la ciencia y tecnología.

2. ¿Qué son los geles?

La palabra gel proviene del latín *gelu*-frío, helado, o *gelatus*-congelado o inmóvil, y están formados por nanopartículas coloidales, monómeros, entrecruzados para formar redes con una estructura tridimensional muy porosa, llegando a absorber y retener hasta en un 99% de su peso en líquido, manteniendo una estructura sólida (Fernández-Barbero *et al.*, 2009). Los monómeros se entrecruzan en polímeros, cadenas de moléculas largas. Estas cadenas pueden a su vez entrecruzarse entre sí formando una red porosa que puede dar lugar a un macrogel, como en las gelatinas del postre, o a nanopartículas blandas de entre 100 nm a 100 μ m. Aunque resulta tentador y lógico separar a estas nanopartículas blandas en microgeles y nanogeles por su tamaño, tal como se muestra en la

Figura 1, lo cierto es que estos términos se usan indistintamente para referirse a menudo al mismo tipo y tamaño de nanopartícula blanda, prefiriendo el término nanogel cuando las aplicaciones son biomédicas (Fernandez-Rodriguez and Álvarez, 2021). En lo siguiente usaremos el término microgel para representar a todos los tamaños de estas nano o micropartículas blandas.

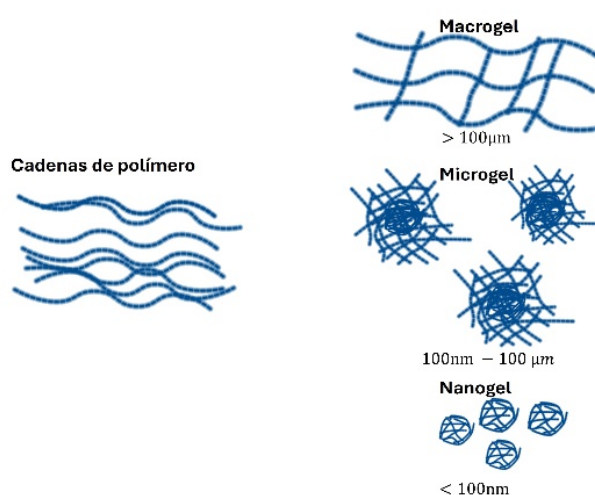


Figura 1: Esquema general de la clasificación de los geles de acuerdo con su tamaño.

El concepto de gel ha evolucionado significativamente desde su primera definición en el siglo XIX. En 1861, el químico británico Thomas Graham introdujo el término coloide para describir sustancias con difusión lenta en dispersión, clasificando materiales como el caucho, el almidón y la gelatina en esta categoría. No obstante, en esa época aún no se comprendía la estructura molecular de la materia, ya que no fue hasta 1908 que Jean Perrin dio prueba de la existencia de las moléculas, obteniendo el Premio Nobel de Física de 1926 por ello. En 1920, Hermann Staudinger, pionero de la química de polímeros, demostró que los materiales como el caucho

y la celulosa estaban formados por conjuntos de unidades moleculares (es decir, monómeros) repetidas y unidas por enlaces covalentes (es decir, entrecruzadas). Por estos avances recibió el Premio Nobel en Química en 1953. El uso de la palabra gel se ha extendido a polímeros entrecruzados en los que la fase continua no es líquida sino gaseosa, llamándose en este caso *aerogel*.

2.1 Clasificando geles

Los geles pueden clasificarse en función de diferentes criterios. El químico estadounidense Paul John Flory definió dos tipos de interacciones que pueden originar geles: enlaces covalentes o agregación física, tanto de monómeros como de cadenas de polímeros. Generalmente, el medio continuo es un líquido, y tendrá propiedades micro y macroscópicas dependientes del tipo de síntesis, entrecruzante, densidades relativas y otros tantos factores. Además de la clasificación por tamaños, la vía de formación de las redes tridimensionales poliméricas porosas es una de las formas recurrentes para categorizar los geles, ya que muchas de sus propiedades y aplicaciones se deben al proceso de entrecruzado y concentración de entrecruzante. Una categoría interesante de este tipo de materiales son los *microgeles*, cuyas propiedades en dispersión y depositados sobre superficies han sido estudiadas recientemente debido a su gran potencial en aplicaciones biomédicas. En lo siguiente hablaremos de las técnicas para caracterizarlos, así como algunas aplicaciones interesantes que hacen de estos materiales una herramienta prometedora para el futuro de los avances tecnológicos en biomedicina.

Función	Material
Sensible a pH	PAA, PMAA, PVME, PVPV, PEI, quitosano, alginato
Sensible a temperatura	PNIPAM, PDEAAm, PVCL, POEGMA, PVME, PEGMA
Sensible a la luz	Polipirrol, espiropirano
Hidrófobo	Metacrilato de glicidilo (GMA)
Sensible a redox	PVCL (BIS)- β -CD metacrilato & vinilferroceno (VFc)

Tabla 1: Polímeros usados para fabricar microgeles según su respuesta a estímulos externos.

3. Microgeles

Los microgeles son partículas coloidales de escala nano a micrométrica que se hinchan cuando están en un buen solvente, es decir, sus cadenas poliméricas se expanden en el medio para maximizar las interacciones polímero-solvente. Una manera de visualizarlo es como una nano o “microesponja” que puede hincharse o estrujarse bajo distintos estímulos externos. El concepto *microgel* fue introducido a la literatura por W. O. Baker en 1949, pero no fue hasta 1986 que Pelton y Chibante sintetizaron los primeros microgeles hechos de hidrogel termosensible. Actualmente existe una amplia variedad de microgeles; algunos de ellos tienen propiedades que los hacen sensibles a más estímulos externos como el pH, fuerza iónica, presión, luz, etc. La capacidad de diseñar microgeles con distintas respuestas a los estímulos externos durante la síntesis de estos, hace que sean llamados frecuentemente materiales *inteligentes* (Fernández-Barbero *et al.*, 2009). Los métodos de síntesis generalmente son por tres vías: polimerización por precipitación (nucleación homogénea de monómeros), con un límite de

tamaño en unas pocas micras, curado tras generar los microgeles por emulsión (generalmente mucho más polidispersos), o curado tras generarlos en chips de microfluídica, permitiendo microgeles de decenas o centenas de micras hasta milímetros. La respuesta a estímulos externos depende del tipo de monómeros añadidos en la síntesis (ver Tabla 1).

4. ¿Cómo caracterizamos los microgeles?

La respuesta común a estímulos externos es su cambio de tamaño, ya sea por incremento de temperatura o cambio de pH, el microgel está en un estado *hinchado* cuando las cadenas poliméricas se expanden en el solvente, reteniendo una gran cantidad del líquido en su estructura tridimensional porosa. Por el contrario, los microgeles pasan al estado *colapsado* (es decir, la “nanoesponja” se estruja sola) cuando la interacción entre las cadenas poliméricas y el líquido se vuelve más desfavorable, colapsando sobre sí mismas.

¿Cómo podemos cuantificar la respuesta de los microgeles a estos estímulos

externos? La respuesta depende de si los microgeles están en dispersión o se encuentran inmovilizados sobre un sustrato sólido.

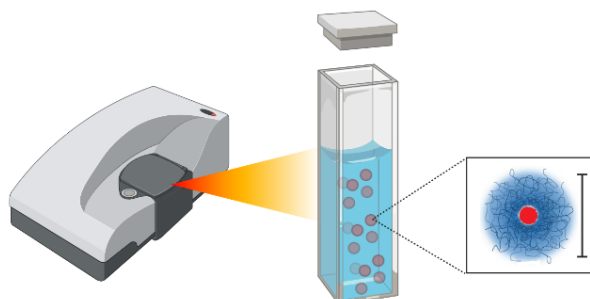


Figura 2: Técnica de dispersión dinámica de luz para evaluar la distribución de tamaños de microgeles en dispersión. A través de un barrido de temperaturas es posible observar el cambio del diámetro en dispersión, el diámetro hidrodinámico D_H , en función de la temperatura.

Al ser partículas blandas que se expanden o colapsan en un determinado líquido, podemos caracterizar su tamaño en dispersión (en inglés, in bulk) mediante la dispersión dinámica de luz (DLS, del inglés dynamic light scattering). Es también frecuente depositar estos microgeles sobre sustratos sólidos para impartir a estos las propiedades de los microgeles, por ejemplo, depositando las partículas en un sustrato mediante técnicas como la balanza de Langmuir-Blodgett, aracterizando su tamaño por microscopía óptica, electrónica o más frecuentemente mediante microscopía de fuerza atómica (AFM, del inglés atomic force microscopy). Ya sea en dispersión o inmovilizadas sobre sustratos, en cada caso existen limitaciones técnicas, por lo que combinar ambas configuraciones nos ofrece información complementaria para comprender más en detalle el comportamiento de estas partículas blandas. Pasamos a definir más en detalle estas técnicas de caracterización

y fabricación.

4.1 Dispersión dinámica de luz

La dispersión dinámica de luz, también conocida como espectroscopía de correlación de fotones (Malm and Corbett, 2019), es frecuentemente usada para medir el tamaño de nanopartículas dispersas en un líquido. Se fundamenta en el desplazamiento aleatorio de las nanopartículas, a causa de los choques continuos y aleatorios con las moléculas del líquido, provocando una transferencia de energía entre ambos.

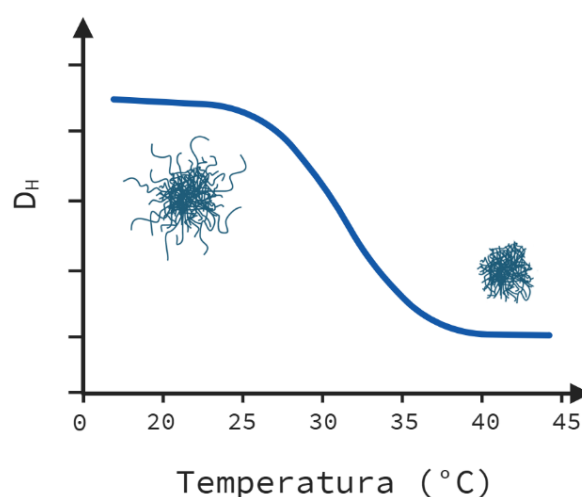


Figura 3: Gráfica típica del diámetro hidrodinámico de microgeles termosensibles medida en DLS. Algunos materiales como el pNIPAM y pVCL tienen su temperatura de transición alrededor de 32 °C, estando hinchados por debajo de esta temperatura y colapsados por encima de esta.

Las nanopartículas se mueven por estas colisiones a velocidades que varían según su tamaño, siendo mayores cuanto menor es su tamaño. Conociendo los demás factores que afectan a este movimiento aleatorio, podemos obtener el diámetro hidrodinámico D_H de las nanopartículas en dispersión (ver **Figura 2**).

Esta técnica es útil para caracterizar la termosensibilidad de los microgeles

de polímeros, midiendo su tamaño frente a la temperatura (ver **Figura 3**). En el caso del pVCL y pNIPAM existe una temperatura de transición alrededor de los 32 °C, una temperatura cercana a la fisiológica que explica su uso como vehículos para fármacos. No obstante, las medidas en diversos medios fisiológicos pueden causar la aglomeración de los microgeles, resultando imposible caracterizar su tamaño en dispersión.

4.2 Balanza de Langmuir-Blodgett

Una manera de evitar los problemas de agregación de microgeles en dispersión cuando se introducen en medios fisiológicos complejos involucra inmovilizar microgeles en interfaces líquidas. Aunque esta inmovilización es muy interesante de por sí, puesto que permite estudiar los microgeles como agentes emulsionantes, a menudo se transfieren estos microgeles adsorbidos en interfaces a sustratos sólidos como vidrio o silicio, haciendo que estos microgeles inmovilizados sean inmunes a la aglomeración que experimentan en dispersión.

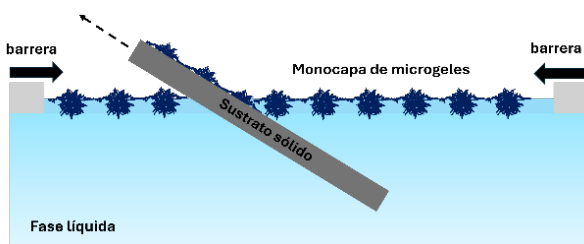


Figura 4: Representación del depositado de monocapas de microgeles por la técnica de Langmuir-Blodgett. Una monocapa de microgeles en la interfase aire/agua es transferida a un sustrato que la atraviesa.

Una de las técnicas más utilizadas para este fin es la fabricación de monocapas de microgeles en la interfase agua/aire o agua/aceite mediante el uso de la balanza de Langmuir-Blodgett (ver **Figura 4**). En esta técnica, los

microgeles se autoensamblan en la interfase, y podemos controlar la densidad de empaquetamiento mediante barreras motorizadas que confinan la monocapa.

Es importante pararse a analizar qué le ocurre a un microgel cuando se adsorbe, ya sea espontáneamente desde el seno de la dispersión (monocapa de Gibbs) o tras depositarlo en la interfase con un agente de extensión como un alcohol (monocapa de Langmuir).

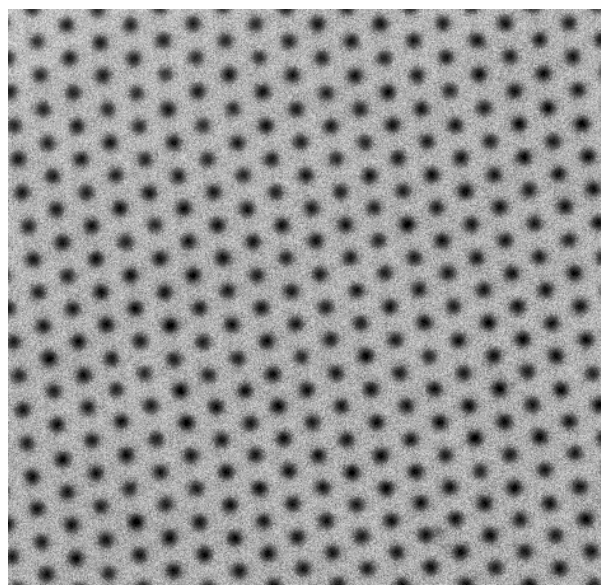


Figura 5: Imagen de microscopía óptica de alta resolución del depositado de una monocapa de microgeles de pVCL sobre un sustrato sólido.

Al llegar a la interfase, la porción directamente en contacto con la interfase se expande tanto como le deja su elasticidad interna. Si fuesen cadenas poliméricas no entrecruzadas, estas se expandirían en la interfase hasta formar una alfombra de una molécula de espesor, porque de este modo se reduce la tensión superficial, lo cual es energéticamente favorable. Pero al poseer un determinado grado de entrecruzamiento, los microgeles usualmente no se pueden expandir tanto, siendo que cuanto más entrecruzado está el microgel, más rígido es y menos

se puede expandir en la interfase. Por otro lado, la porción del microgel que asoma al aire o al aceite está completamente colapsada porque son malos solventes de estos, mientras que la porción del microgel en la subfase acuosa sigue estando bien solvatada. Para entender la magnitud de las fuerzas que rigen la deformación en la interfase podemos notar que la porción extendida en la interfase deja de ser termosensible, mientras que la porción inmersa en la subfase sigue siendo termosensible (Rubio-Andrés *et al.*, 2024). Visto desde arriba, la forma del microgel parece la de un huevo frito con la clara correspondiendo a la porción del microgel extendida en la interfase; visto desde lateral, la forma del microgel parece la de una medusa cotylorhiza tuberculata (a su vez también conocida como "huevo frito"). Una vez entendido qué le pasa a un microgel, pasamos a entender qué pasa a una colección de ellos que se adsorben en una interfase. Cuando hay suficientes microgeles, estos se empaquetan formando una red hexagonal compacta en la que los microgeles se tocan a través de las claras de los huevos fritos.

Cuando hacemos atravesar un sustrato sólido a través de la monocapa, esta se deposita sobre el sustrato y la adhesión de los microgeles puede ser suficientemente grande como para poder sumergir el sustrato cubierto de microgeles en líquido sin que los microgeles se muevan de su sitio. No obstante, la porción del microgel en contacto con el líquido se hincha y muestra sensibilidad a los distintos estímulos externos ya mencionados.

De esta forma, obtenemos superficies recubiertas de microgeles que podemos caracterizar mediante técnicas de microscopía óptica, electrónica o de fuerza atómica, con la ventaja de

estar inmovilizadas sobre la superficie del sustrato, pero seguir teniendo la posibilidad de hincharse parcialmente y mostrar sensibilidad a estímulos externos. Un ejemplo de monocapa se muestra en la **Figura 5**, con microgeles de pVCL sintetizados en el Laboratorio de Física de Superficies y Biocoloides de la Universidad de Granada, España. Una vez autoensamblados en una interfase agua/aire y depositados sobre un sustrato sólido, podemos evaluar sus propiedades sin que modifiquen su ordenamiento. Es interesante recalcar que, aunque en las imágenes de microscopía pareciera que los microgeles están separados, en realidad estamos viendo las yemas de los huevos fritos, y los microgeles se tocan a través de sus claras, que llegan a ser tan finas como el espesor de varias moléculas.

4.3 Microscopía de fuerza atómica

La microscopía de fuerza atómica (AFM) es una técnica que permite caracterizar la topografía de una muestra mediante el uso de una punta afilada de pocos nanómetros de espesor; llegando a resoluciones laterales de pocos nanómetros y verticales por debajo del nanómetro. Es muy útil para obtener la topografía de superficies de las monocapas de microgel depositado (**Figura 6**), e incluso de materiales biológicos como células. La adaptación de celdas para líquidos permite incluso observar y medir procesos electroquímicos y biológicos *in-situ*. Nótese nuevamente que el espesor de las claras de los huevos fritos es tan pequeño y uniforme que incluso en AFM pareciera que los microgeles están separados unos de otros, cuando se tocan a través de las claras, como hemos explicado.

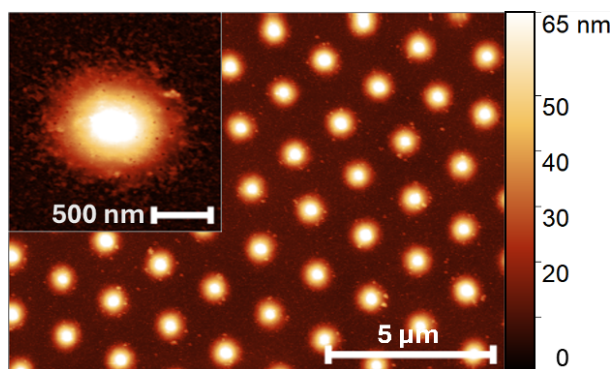


Figura 6: Imagen de AFM de una monocapa de microgel de pVCL depositada sobre un sustrato sólido.

Una de las razones principales para el uso del AFM para medir microgeles es la posibilidad de cuantificar in-situ el proceso de hinchado o deshinchado dentro de un líquido más o menos complejo. Por ejemplo, el AFM con celda para líquidos ha hecho posible trabajar en las condiciones necesarias para mantener células vivas o para tener materiales como los microgeles exhibiendo su sensibilidad ante estímulos externos al poder hincharse y deshincharse en el medio líquido de estudio. Esto permite determinar sus propiedades viscoelásticas e incluso la capacidad de retención de líquidos en su estructura. Una representación esquemática de este tipo de celda se muestra en la **Figura 7**.

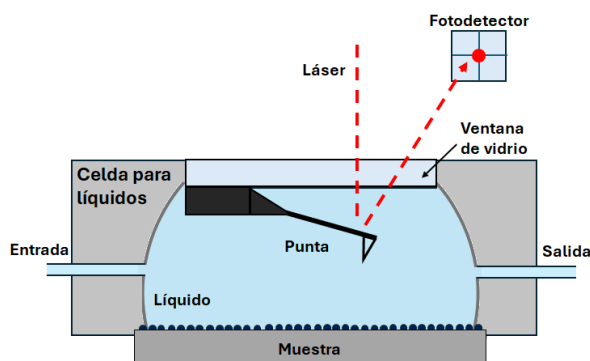


Figura 7: Esquema de la configuración de celda para líquidos en AFM. La sonda queda inmersa en el líquido, por lo que se somete a fuerzas debidas al medio.

Usando este método podemos estudiar la capacidad de absorción de líquido de los microgeles en tiempo real. Esto es especialmente útil para su uso en biomedicina, por ejemplo, en la liberación de fármacos, el cultivo de células para regeneración de tejidos, etc.

5. Aplicaciones

Poder variar el volumen de los microgeles en respuesta a diversos estímulos les confiere de un amplio potencial de aplicaciones científicas, tecnológicas, médicas e industriales (Fernández- Barbero *et al.*, 2009). Algunas aplicaciones son las siguientes:

5.1 Biomateriales

Una de las principales razones de su uso en biomedicina es su biocompatibilidad, dando pie a múltiples aplicaciones biomédicas, principalmente en la liberación de fármacos y en la regeneración de tejidos (Agrawal and Agrawal, 2018). Además, algunos geles basados en biopolímeros como el almidón, celulosa, colágeno, elastina o queratina, son utilizados en formulaciones de la industria cosmética, y otros tienen propiedades mecánicas estables que permiten sean usados en medicina regenerativa como soluciones inyectables para los discos intervertebrales, regeneración de cartílago, fluido sinovial, entre otros (Nguyen *et al.*, 2021).

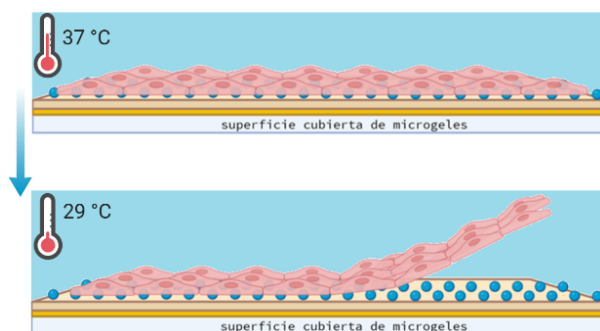


Figura 8: Representación del cultivo de láminas de células sobre sustratos cubiertos de microgeles. Al disminuir la temperatura por debajo de la temperatura de transición, los microgeles se hinchan, despegando las capas de células mecánicamente sin necesidad de tripsina.

Debido a la biocompatibilidad y a sus propiedades hidrófilas, los sustratos de microgeles compuestos de hidrogel permiten el crecimiento y proliferación de células. Incluso es posible generar andamios con sustratos porosos a base de hidrogeles con potencial aplicación en regeneración de tejidos.

Algunas investigaciones utilizan hidrogeles para imitar el ambiente extracelular tridimensional, de tal forma que se logra modelar un microambiente in-vitro donde pueden estudiar el comportamiento celular (Dubay *et al.*, 2021). En esta área se han desarrollado métodos de crecimiento celular usando microgeles termosensibles como sustrato, pudiendo cosechar estas capas de células variando la temperatura del medio sin la necesidad de usar proteasas como la tripsina, evitando con esto dañar la membrana celular en el proceso (ver **Figura 8**).

5.3 Liberación de fármacos

Debido a la alta capacidad de absorción de líquidos y otras moléculas en disolución, los microgeles se utilizan para atrapar físicamente fármacos,

proteínas, carbohidratos, e incluso ADN dentro de su red polimérica.

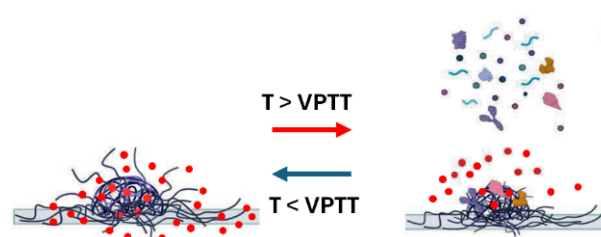


Figura 9: Representación de la liberación de fármacos inducida por temperatura mediante el uso de microgeles termosensibles. El fármaco es capturado en la red polimérica del microgel y posteriormente liberado al calentar por encima de la temperatura de transición, cercana a los 32 °C.

Algunos de estos microgeles son sensibles a cambios de temperatura y pH, y esta propiedad puede ser usada para controlar la liberación de las moléculas de su interior (**Figura 9**). Las estrategias más complejas llegan a utilizar ligandos que pueden reconocer receptores específicos en células cancerígenas (Campora *et al.*, 2021) dirigiendo el tratamiento solo a las células dañadas.

Investigaciones recientes como las realizadas en el Grupo de Biocoloides y Física de Fluidos de la Universidad de Granada en colaboración con investigadores de la Universidad de Sinaloa sobre la capacidad de adsorción de proteínas y vesículas extracelulares producidas por células, resuelven ciertas interrogantes sobre el comportamiento de estos microgeles en condiciones fisiológicas, y abren la posibilidad de utilizar este tipo de microgeles como agentes teranósticos en enfermedades como el cáncer. Aún falta mucho camino que recorrer, pero cada paso es importante en el mundo de las aplicaciones de la ciencia y nanotecnología.

6. Conclusiones

Los microgeles representan una nueva generación de biomateriales inteligentes con una amplia variedad de aplicaciones biomédicas y tecnológicas. Gracias a la versatilidad del uso de monómeros en su síntesis, podemos modular su capacidad de respuesta a estímulos externos, así como su capacidad para cargar y liberar moléculas. Debido a este enorme potencial, se perfilan como herramienta clave en la medicina, ingeniería de tejidos y liberación controlada de fármacos. Aunque queda mucho por explorar, los microgeles marcan el camino hacia soluciones eficientes y seguras en la biomedicina y nanotecnología del futuro.

Referencias

- [1] Agrawal, G. and Agrawal, R. (2018). Functional microgels: recent advances in their biomedical applications. *Small*, 14(39):1801724.
- [2] Campora, S., Mohsen, R., Passaro, D., Samir, H., Ashraf, H., Al-Mofty, S. E.-D., Diab, A. A., El-Sherbiny, I. M., Snowden, M. J., and Ghersi, G. (2021). Functionalized poly (n-isopropylacrylamide)-based microgels in tumor targeting and drug delivery. *Gels*, 7(4):203.
- [3] Dubay, R., Urban, J. N., and Darling, E. M. (2021). Single-cell microgels for diagnostics and therapeutics. *Advanced functional materials*, 31(44):2009946.
- [4] Fernández-Barbero, A., Suárez, I. J., Sierra-Martín, B., Fernández-Nieves, A., de Las Nieves, F. J., Marquez, M., Rubio-Retama, J., and López-Cabarcos, E. (2009). Gels and microgels for nanotechnological applications. *Advances in colloid and interface science*, 147:88–108.
- [5] Fernandez-Rodriguez, M. A. and Alvarez, L. (2021). Microgels and nanogels at interfaces and emulsions: Identifying opportunities from a bibliometric analysis. *Frontiers in Physics*, 9.
- [6] Malm, A. V. and Corbett, J. C. (2019). Improved dynamic light scattering using an adaptive and statistically driven time resolved treatment of correlation data. *Scientific reports*, 9(1):13519.
- [7] Nguyen, T. P., Li, F., Shrestha, S., Tuan, R. S., Thissen, H., Forsythe, J. S., and Frith, J. E. (2021). Cell-laden injectable microgels: Current status and future prospects for cartilage regeneration. *Biomaterials*, 279:121214.
- [8] Rubio-Andrés, A., Bastos-González, D., and Fernandez-Rodriguez, M. A. (2024). Tuning the bulk behavior and 2d interfacial self-assembly of microgels by kegg-in-type polyoxometalate ionic specificity. *Journal of Molecular Liquids*, 400:124496.

Inteligencia Artificial en el desarrollo de fármacos: retos y oportunidades para su uso responsable

Dr. Jorge Arturo Hernández Valencia
Dr. Martiniano Bello Ramírez

Laboratorio de Diseño y Desarrollo de Nuevos Fármacos e Innovación Biotecnológica
Escuela Superior de Medicina del Instituto Politécnico Nacional

Abstract

Drug development is a lengthy process involving high costs and a high failure rate. Currently, the most widely used method is one based on experience and scientific literature. However, there is a large amount of healthcare data, but most of it is fragmented or isolated, and incorporating it could increase the success rates of clinical trials. Artificial Intelligence (AI) can accelerate this process with its ability to quickly analyze and integrate large amounts of data, delivering more accurate results. Furthermore, it is essential to address ethical and legal considerations when incorporating AI technologies into clinical trials. To this end, policies and safety measures are emerging for their responsible use in medical attention and to ensure safe and effective implementation.

Keywords: Artificial Intelligence, Drug development, ethics, data analysis

Resumen

El desarrollo de fármacos es un proceso largo que implica altos costos y una elevada tasa de fracaso. Actualmente, el método más utilizado se basa en la experiencia y la literatura científica. Sin embargo, existe una gran cantidad de datos sanitarios, pero la mayoría están fragmentados o aislados, y su integración podría aumentar las tasas de éxito de los ensayos clínicos. La Inteligencia Artificial (IA) puede acelerar este proceso gracias a su capacidad para analizar e integrar rápidamente grandes cantidades de datos, lo que permite obtener resultados más precisos. Además, es fundamental abordar las consideraciones éticas y legales al incorporar tecnologías de IA en los ensayos clínicos. Con este fin, están surgiendo políticas y medidas de seguridad para su uso responsable en la

atención médica y para garantizar una implementación segura y eficaz.

Palabras clave: Inteligencia Artificial, Desarrollo de fármacos, Ética, Análisis de datos

Introducción

En estos tiempos en que la Inteligencia Artificial (IA) está impactando de manera profunda en nuestra sociedad, en cómo vemos y percibimos el mundo, ya que nos beneficia en la optimización de tareas y procesos complejos y en el avance en áreas como la educación, la investigación científica y la medicina es imperante conocer las oportunidades, desafíos y los riesgos éticos y sociales de su uso.

Ante toda esta fuerza transformadora e innovadora de la IA y además de su uso en la edición de fotos y videos que vemos a diario en nuestras redes sociales, alguna vez te has preguntado, ¿Cómo puede ayudar la IA en la medicina con el desarrollo de fármacos que son utilizados para el tratamiento de diversas enfermedades humanas y cómo usarla de manera responsable? En este breve artículo lo exploraremos, pero antes es necesario saber que, actualmente, el desarrollo de fármacos sigue siendo arriesgado, con un coste medio de comercialización de hasta 1.300 millones de dólares y una baja probabilidad de éxito (Mullard, 2020). El método que más se usa es el basado en la experiencia de científicos, médicos y farmacólogos, apoyado en gran medida en la literatura científica existente y en las vías biológicas conocidas. Si bien este enfoque sigue desempeñando un papel fundamental, se hace cada vez más hincapié en aprovechar la enorme cantidad de datos sanitarios existentes en el mundo.

Incorporar datos del mundo real (DMR) procedentes de historiales clínicos electrónicos, registros de pacientes y dispositivos portátiles en la investigación clínica y en el desarrollo de fármacos tiene el potencial de reducir el riesgo de fracaso al optimizar la toma de decisiones, mejorar los resultados de los pacientes y aumentar las tasas de éxito de los ensayos clínicos. Para el lanzamiento exitoso de nuevos fármacos, los investigadores deben poder acceder y agregar estos datos, y la realidad es que gran parte de ellos permanece fragmentado y aislado en sistemas dispares (Zhao, 2022).

Aquí es donde entra la Inteligencia Artificial

A medida que aumenta la expectativa de vida y las enfermedades crónicas se vuelven más comunes, encontrar tratamientos eficaces y seguros es un desafío global. La IA puede acelerar este proceso. Con su capacidad para analizar e integrar grandes cantidades de datos dispares con rapidez y precisión, identificar patrones y realizar predicciones fiables, se abre una gran oportunidad en las aplicaciones de la IA en la investigación clínica y el desarrollo de fármacos. Hoy en día, las empresas farmacéuticas pueden usar la IA para minimizar los riesgos en la fase clínica al comprender a las poblaciones de pacientes, crear mejores protocolos de ensayos clínicos, predecir y evitar posibles problemas, identificar mejor a los pacientes para su inscripción y mucho más (Blanco-Gonzalez, 2023) pero plantea también interrogantes éticos y regulatorios que deben atenderse.

En 2024, la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA) aprobó 50 nuevos medicamentos y 55 en 2023, la segunda

cifra más alta en los últimos 30 años (FDA, 2024). Además, más de 6000 productos se encuentran en desarrollo activo en todas las fases. Con estas cifras, el panorama parece prometedor.

Sin embargo, los obstáculos actuales en el desarrollo de fármacos revelan una situación algo más sombría, por ejemplo, el 85% de los ensayos clínicos experimenta algún tipo de retraso, lo que supone un alto costo, además que un alto porcentaje de los pacientes abandonan los ensayos de fase III. Muchas empresas tendrán dificultades para completar el proceso de inscripción de participantes debido a: un alto volumen de ensayos, medicamentos y criterios de elegibilidad más específicos y, diversidad étnica, lo que significa que solo unos pocos participantes calificarán (Idnay, 2023).

Todos los desafíos mencionados plantean preguntas cruciales para las empresas que desarrollan un nuevo fármaco y no existen respuestas fáciles, por ejemplo:

- ¿Cómo cumplen las empresas los criterios ideales para un ensayo clínico y, al mismo tiempo, descubren si esos participantes existen?
- ¿Pueden las empresas identificar a los participantes que podrían abandonar el ensayo?
- En cuanto a la eficacia y la seguridad, ¿qué participantes tienen más probabilidades de responder al tratamiento?
- ¿Cómo pueden las empresas inscribir a participantes más diversos?
- ¿Se pueden anticipar los eventos adversos?

La buena noticia es que la IA

puede ayudar significativamente a las empresas farmacéuticas a abordar estas preguntas mediante el uso de análisis de datos avanzados, modelos predictivos, aprendizaje automático y técnicas de

aprendizaje profundo que mejoran la seguridad y la eficacia al ofrecer resultados más precisos y basados en datos (Figura 1).

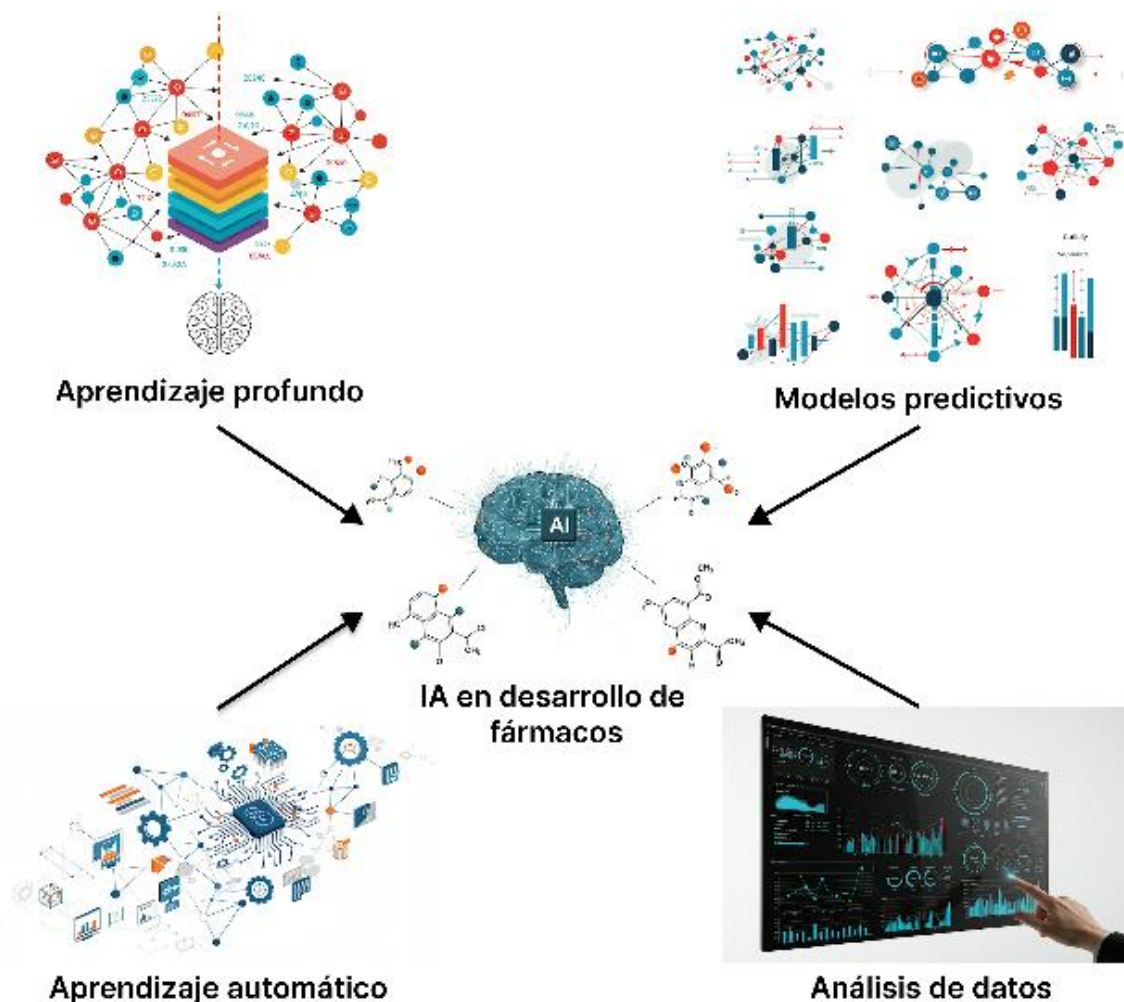


Figura 1: Ejemplos de herramientas de IA aplicadas en la toma de decisiones de las empresas farmacéuticas, que impulsan la innovación y aceleran el desarrollo de fármacos. Elaboración propia.

Datos en Ciencias de la Vida

Los ensayos controlados aleatorios (ECA) siguen siendo el estándar de oro para el desarrollo de fármacos, con entornos muy controlados y datos recopilados sistemáticamente y completos. En los ECA, el sesgo se reduce al ser un experimento adecuado para el propósito, y la calidad es mejor que la de los DMR. Estos ensayos están diseñados para minimizar las variables y garantizar que los

efectos del tratamiento sean aislados, proporcionando una medida clara de su potencial terapéutico. El desafío de los ECA es que, lamentablemente, la población del ensayo no suele ser representativa de la población general.

Los DMR tienen un gran potencial para transformar las ciencias de la vida al aumentar significativamente los datos de los ensayos clínicos. Pueden ayudar a agilizar el proceso de aprobación, acelerar el tiempo de comercialización

de nuevas terapias y permitir que los organismos reguladores evalúen el rendimiento de los fármacos más allá de la fase de ensayo. Los DMR puede ayudar a subsanar la falta de datos en ensayos clínicos y proporcionar una visión más realista y centrada en el paciente sobre cómo funcionan los tratamientos en la vida cotidiana, en entornos prácticos tras su aprobación, donde las poblaciones de pacientes son más diversas y menos controladas. En definitiva, los DMR puede contribuir a una mejor toma de decisiones y a la seguridad a largo plazo, mejorando así los resultados de los pacientes.

conlleva desafíos que deben abordarse para alcanzar su máximo potencial. Garantizar la precisión y la calidad de los datos es fundamental, ya que las inconsistencias, la falta de datos y la variación de formatos pueden generar información errónea si no se gestionan adecuadamente. Además, es fundamental abordar cuidadosamente las consideraciones éticas y legales (Figura 2), como el consentimiento del paciente y la privacidad de los datos, para mantener la confianza y cumplir con normativas como, en el caso de México, la Ley Federal de Protección de Datos Personales y la Ley General de Salud.

Aprovechar los DMR de forma eficaz



Figura 2: Consideraciones éticas y legales que ayudan a abordar los desafíos asociados con el uso de la IA en la atención médica. Diagrama adaptado de Naik, 2022.

Al incorporar tecnologías de IA, los investigadores pueden obtener información significativa y profunda y descubrir nuevas posibilidades de análisis, así una forma mucho más avanzada e impactante de utilizar los DMR en comparación con los métodos

tradicionales. La IA puede analizar grandes volúmenes de datos, ya sean organizados o no, provenientes de múltiples fuentes, lo que permite una clasificación más precisa de los pacientes, una identificación más rápida de quienes responden al tratamiento y un seguimiento en tiempo real en poblaciones más amplias, también ayuda a automatizar los procesos de limpieza e integración de datos, mejorando su calidad y reduciendo el error humano. A medida que el uso responsable de los DMR adquiere cada vez mayor importancia en las ciencias de la vida, la colaboración entre la industria, los organismos reguladores y los proveedores de tecnología será esencial para establecer estándares y marcos que garanticen el uso responsable de estos valiosos datos (Naik, 2022).

IA en acción: Casos de uso en el desarrollo de fármacos

Las aplicaciones de la IA están transformando la forma en que la industria farmacéutica innova. En esta sección exploraremos dos casos prácticos de la IA en el desarrollo de fármacos, demostrando su potencial para revolucionar la investigación y el descubrimiento clínicos.

Optimización de resultados de los ensayos clínicos mediante aprendizaje profundo y el modelado predictivo.

La aplicación de herramientas transformadoras del aprendizaje profundo (como las redes neuronales artificiales diseñadas para procesar datos y clasificar pacientes, pronosticar eventos adversos y personalizar planes de tratamiento) y del modelado predictivo (como el análisis de supervivencia para predecir los resultados de los ensayos, mejorar la eficiencia y reducir las tasas de fracaso)

han contribuido a impulsar el papel de la IA en la atención médica personalizada y a mejorar el diseño y las tasas de éxito de los ensayos clínicos.

Dichas herramientas hacen uso de los DMR, como las notas de los pacientes y los protocolos de los ensayos, así como de datos demográficos estructurados de pacientes y datos genómicos con la finalidad de optimizar los flujos de trabajo de los ensayos clínicos, mejorar los resultados centrados en el paciente y reducir los costos asociados a las ineficiencias de los ensayos (Anuyah, 2024).

Herramienta basada en IA para mejorar la precisión de los medicamentos en pacientes con cáncer.

Investigadores del Instituto Nacional de la Salud (NIH, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos desarrollaron una herramienta de IA que utiliza datos de células individuales dentro de un tumor para predecir si un paciente responderá a un fármaco específico.

Los métodos actuales para la compatibilidad de pacientes con fármacos se basan en la secuenciación masiva del ADN y el ARN que promedia todas las células de una muestra tumoral. Sin embargo, los tumores contienen más de un tipo de célula y pueden tener muchas subpoblaciones celulares diferentes conocidas como clonas, las cuales pueden responder de forma diferente a fármacos específicos, lo que podría explicar por qué algunos pacientes no responden a ciertos fármacos o desarrollan resistencia a ellos.

Una tecnología más reciente, conocida como secuenciación de ARN unicelular, proporciona datos con una resolución

mucho mayor, incluso a nivel de célula única. Este enfoque para identificar y dirigirse a clonas individuales puede generar respuestas farmacológicas más duraderas. En el estudio analizaron si era posible utilizar una técnica de aprendizaje automático denominada *aprendizaje por transferencia*, para entrenar un modelo de IA con el fin de predecir las respuestas a fármacos utilizando datos masivos de secuenciación de ARN ampliamente disponibles, y luego ajustar dicho modelo utilizando datos de secuenciación de ARN de células individuales. Utilizando

este enfoque con datos publicados de líneas celulares procedentes de análisis de fármacos a gran escala, crearon modelos de IA para 44 fármacos oncológicos aprobados por la FDA. Los modelos de IA predijeron con precisión cómo responderían las células individuales tanto a fármacos individuales como a combinaciones de fármacos (Figura 3). Sin embargo, advirtieron que la precisión de esta técnica mejorará si los datos de secuenciación de ARN unicelular se hacen más accesibles (Sinha, 2024).

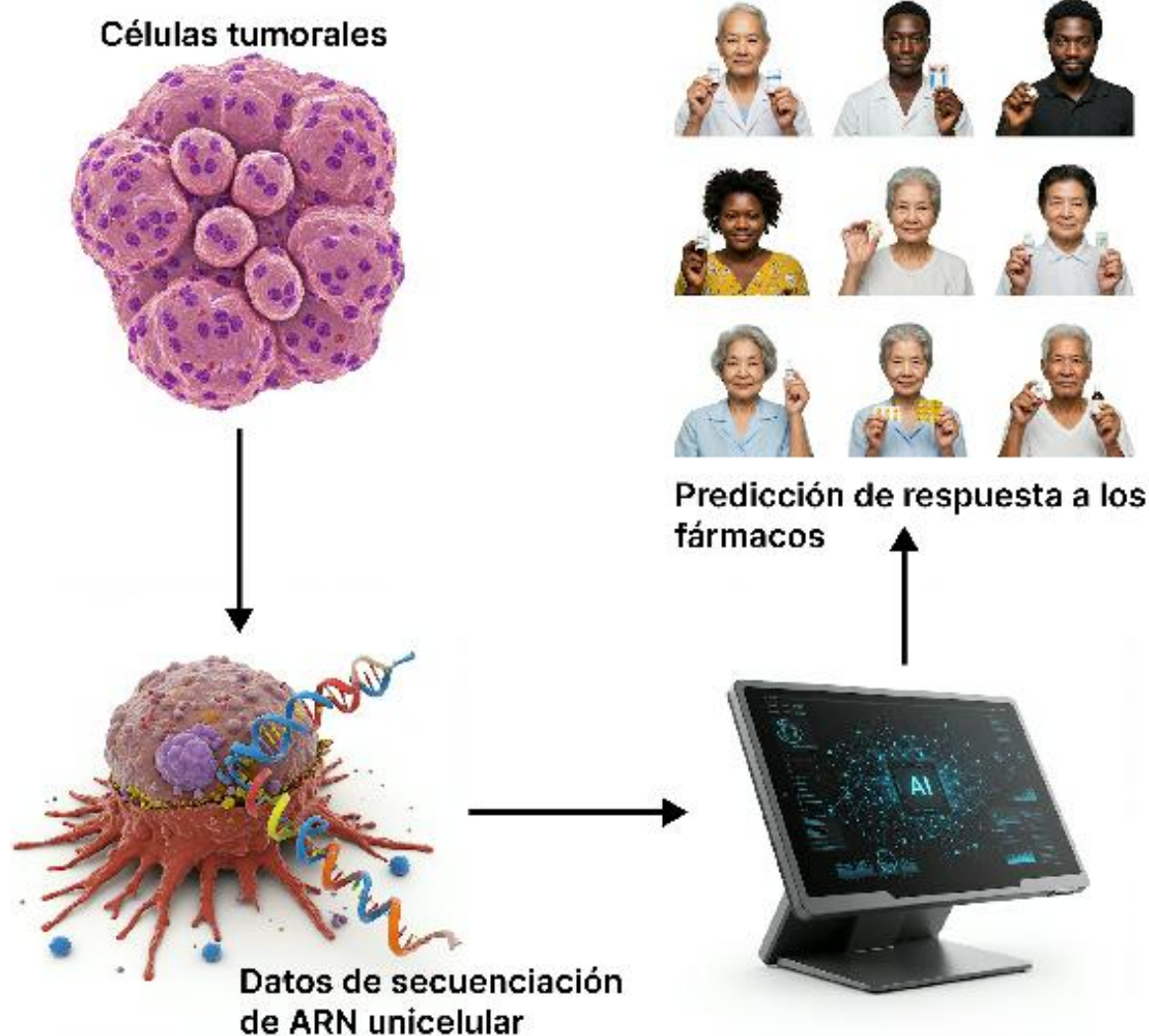


Figura 3: Los datos de expresión de ARN de células tumorales individuales fueron utilizados para crear un modelo de IA para predecir la respuesta a fármacos. Diagrama adaptado de National Cancer Institute (NCI), 2024.

Dirigir la IA de forma responsable

Tanto en los dos casos anteriormente descritos como en la investigación científica, las medidas de seguridad para el uso de la IA son esenciales para garantizar una implementación segura, ética y eficaz. Están surgiendo numerosas políticas para la IA que varían considerablemente según el país. Sin embargo, por parte de organizaciones políticas, reguladoras y profesionales, incluidas la FDA, Health Canada, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Asociación Estadounidense de Informática Médica (AMIA) se han propuesto 8 principios rectores para el desarrollo responsable de herramientas de IA para la atención sanitaria (Badal, 2023) los cuales son:

Principio 1: Las herramientas de IA deben tener como objetivo aliviar las disparidades sanitarias existentes.

Principio 2: Los resultados de las herramientas de IA deben ser clínicamente significativos.

Principio 3: Las herramientas de IA deben tener como objetivo reducir el sobrediagnóstico y el sobret ratamiento.

Principio 4: Las herramientas de IA deben aspirar a tener un alto valor en la atención médica y evitar desviar recursos de áreas de mayor prioridad.

Principio 5: Las herramientas de IA deben considerar los factores biográficos de la salud.

Principio 6: Las herramientas de IA deben diseñarse para adaptarse fácilmente a la población local.

Principio 7: Las herramientas de IA deben promover un sistema de atención sanitaria que aprenda.

Principio 8: Las herramientas de IA deben facilitar la toma de decisiones compartida.

Estos 8 principios, elevarán el estándar al que se someten las herramientas de IA. No se consideran estos principios como opcionales, sino cruciales y necesarios para hacer realidad los beneficios de la IA en la atención médica.

Conclusión

Es evidente que la IA desempeña un papel importante en la atención médica moderna; su integración en la investigación clínica y el desarrollo de fármacos ofrece oportunidades sin precedentes para revolucionar la prestación de servicios de salud. Al aprovechar la capacidad de la IA para analizar grandes conjuntos de datos, optimizar los procesos de ensayos clínicos y mejorar la precisión predictiva, los investigadores y empresas pueden acelerar el descubrimiento de fármacos y mejorar los resultados de los pacientes, mientras que la validación clínica garantiza que los modelos de IA funcionen con precisión en entornos reales. El reto no es solo que estas tecnologías estén disponibles para quienes las necesiten, sino que tengan unas directrices claras que fomenten la confianza, la innovación y el uso responsable, ético e inclusivo de la IA en la atención médica personalizada orientada a mejorar la salud de todas las personas.

Referencias

- [1] Anuyah, S., K Singh, M., Nyavor, H. (2024). Advancing clinical trial outcomes using deep learning and predictive modelling: bridging precision medicine and patient-centered care. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 24(03), 001–025.

- <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.24.3.3671>
- [2] Badal, K., Lee, C. M., & Esserman, L. J. (2023). Guiding principles for the responsible development of artificial intelligence tools for healthcare. *Commun Med (Lond)*, 3(1), 47. <https://doi.org/10.1038/s43856-023-00279-9>
- [3] Blanco-Gonzalez, A., Cabezon, A., Seco-Gonzalez, A., Conde-Torres, D., Antelo-Riveiro, P., Pineiro, A., & Garcia-Fandino, R. (2023). The Role of AI in Drug Discovery: Challenges, Opportunities, and Strategies. *Pharmaceuticals (Basel)*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/ph16060891>
- [4] FDA (2024). "Novel Drug Approvals for 2024". Recuperado el 15 de mayo de 2025, de <https://www.fda.gov/drugs/novel-drug-approvals-fda/novel-drug-approvals-2024>
- [5] Idnay, B., Butler, A., Fang, *et al.* (2023). Principal Investigators' Perceptions on Factors Associated with Successful Recruitment in Clinical Trials. *AMIA Jt Summits Transl Sci Proc*, 2023, 281-290.
- [6] Mullard, A. (2020). \$1.3 billion per drug? *Nat Rev Drug Discov*, 19(4), 226. <https://doi.org/10.1038/d41573-020-00043-x>
- [7] Naik, N., Hameed, B. M. Z., *et al.* (2022). Legal and Ethical Consideration in Artificial Intelligence in Healthcare: Who Takes Responsibility? *Front Surg*, 9, 862322. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2022.862322>
- [8] NCI (2024). NIH researchers develop AI tool with potential to more precisely match cancer drugs to patients. Recuperado el 20 de mayo de 2025, de <https://www.cancer.gov/news-events/press-releases/2024/ai-tool-matches-cancer-drugs-to-patients>
- [9] Sinha, S., Vegesna, R., *et al.* (2024). PERCEPTION predicts patient response and resistance to treatment using single-cell transcriptomics of their tumors. *Nat Cancer*, 5(6), 938-952. <https://doi.org/10.1038/s43018-024-00756-7>
- [10] Zhao, X., Iqbal, S., Valdes, I. L., Dresser, M., & Girish, S. (2022). Integrating real-world data to accelerate and guide drug development: A clinical pharmacology perspective. *Clin Transl Sci*, 15(10), 2293-2302. <https://doi.org/10.1111/cts.13379>

Contaminación por ozono en cinco sitios de la Zona Metropolitana del Valle de México

Lic. Armando Correa García

**Facultad de Biología, Universidad Michoacana
de San Nicolás de Hidalgo**

Abstract

The sustained increase in ozone levels, beginning in 2015 southwest of Mexico City and the activation of environmental contingencies in May 2024, could have adverse health effects, such as itchy eyes and reduced respiratory function. Therefore, this study analyzed the current status of this pollutant at five monitoring sites in the Metropolitan Area of the Valley of Mexico (MAVM). Overall, an increase in O_3 levels was found in the northwest, northeast, center, and southeast of the MAVM, ranging from 11% to 41%. The average of 0.064 ppm in May 2024 in Pedregal, southwest of the city, coincided with the values recorded in the 1980s.

Keywords: Ozone, environmental contingency, linear regression

Resumen

El incremento sostenido del ozono, a partir del 2015 al suroeste de la ciudad de México y la activación de las contingencias ambientales en mayo 2024, podría tener efectos adversos en la salud, tal como picazón en los ojos y reducción de la función respiratoria. Por ello, en este estudio se analizó la situación actual de este contaminante, en cinco sitios de monitoreo de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). En general, se halló un aumento del O_3 al noroeste, noreste, centro y sureste de la ZMVM en un rango de 11% a 41%. El promedio en mayo 2024 de 0.064ppm en Pedregal, al suroeste de la ciudad coincidió con los valores registrados en la década de los años 80' del siglo pasado.

Palabras clave: Ozono, contingencia ambiental, regresión lineal

Introducción

Al inicio del nuevo milenio, en la

Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se logró la reducción de los niveles de contaminación del aire, por ejemplo, el ozono (O_3) dejó de aumentar, en contraste con la tendencia que tenía al inicio de la década de los años noventa del siglo pasado Programa para el mejoramiento de la calidad del aire de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), (PROAIRE, 2002-2010). Incluso, de 1993 al 2016 se registraron los valores más bajos de O_3 (Riveros, 2016). Asimismo, al suroeste de la ciudad de México en el sitio Pedregal, el O_3 bajó 24% (0.034ppm) del periodo 1987-2022 con respecto al valor de 0.044ppm registrado en 1987 (Correa-García, 2023); pero también se advirtió de un incremento sostenido de 17%, a partir del año 2015.

Por otra parte, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME, 2024) informó el 23 de mayo la permanencia de la Fase I de contingencia ambiental atmosférica por ozono en la ZMVM. En seguida la (CAME, 2024a) activó el 25 de mayo del 2024 la contingencia ambiental atmosférica por ozono, debido a la estabilidad atmosférica, intensa radiación solar y altas temperaturas por arriba de los 30°C. Este evento, contabilizó la onceava contingencia ambiental declarada en 2024. Acercándose, así a los 12 episodios ocurridos tiempo atrás en 1993 según reporte recibido por (Enciso, 2024). Debido a esto, se analizaron los datos de los contaminantes atmosféricos monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), óxidos de nitrógeno (NO_X), ozono (O_3), dióxido de (SO_2), partículas suspendidas de 10 y 2.5 micras (PM_{10} , $PM_{2,5}$); los parámetros meteorológicos temperatura (TEMP), humedad relativa (HR) y velocidad del viento (WS) de cinco sitios de monitoreo Pedregal (PED), Benito Juárez (BJU), Camarones (CAM), Montecillos (MON)

y Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco (UAX). Ubicadas cada una de estas, en las 5 zonas que comúnmente se divide a la ZMVM en Noroeste (NW), Noreste (NE), Centro (CEN), Suroeste (SW) y Sureste (SE) (Figura, 1)

Lo anterior, fue con el propósito de indagar los factores que influyen en la contaminación por O_3 y determinar la tendencia del promedio anual del O_3 del periodo 1987-2024 en PED-SW; BJU-CEN de 1993 a 2024; CAM-NW 1997-2024; MON-NE y 2011-2024 en UAX-SE. Pues este contaminante secundario es un fuerte oxidante que en altas concentraciones pica en los ojos y reduce la función respiratoria (Xu Li, 2021).

Metodología

Los datos de los contaminantes atmosféricos y meteorología, citados previamente se consiguieron de la Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal (SMADF). El área de estudio corresponde a la zona noroeste, noreste, centro, suroeste y sureste de la ZMVM (Figura, 1). La información se arregló en una hoja de cálculo por mes y día del año. En seguida, se validó la información bajo el criterio del 75% de suficiencia diaria; es decir, los días que reunieron 18 de 24 registros. De esta forma se determinó el tamaño de la muestra "X" con respecto a la muestra esperada del 100% para el año y mes de 8,760 y 744 datos respectivamente (Tabla, 1).

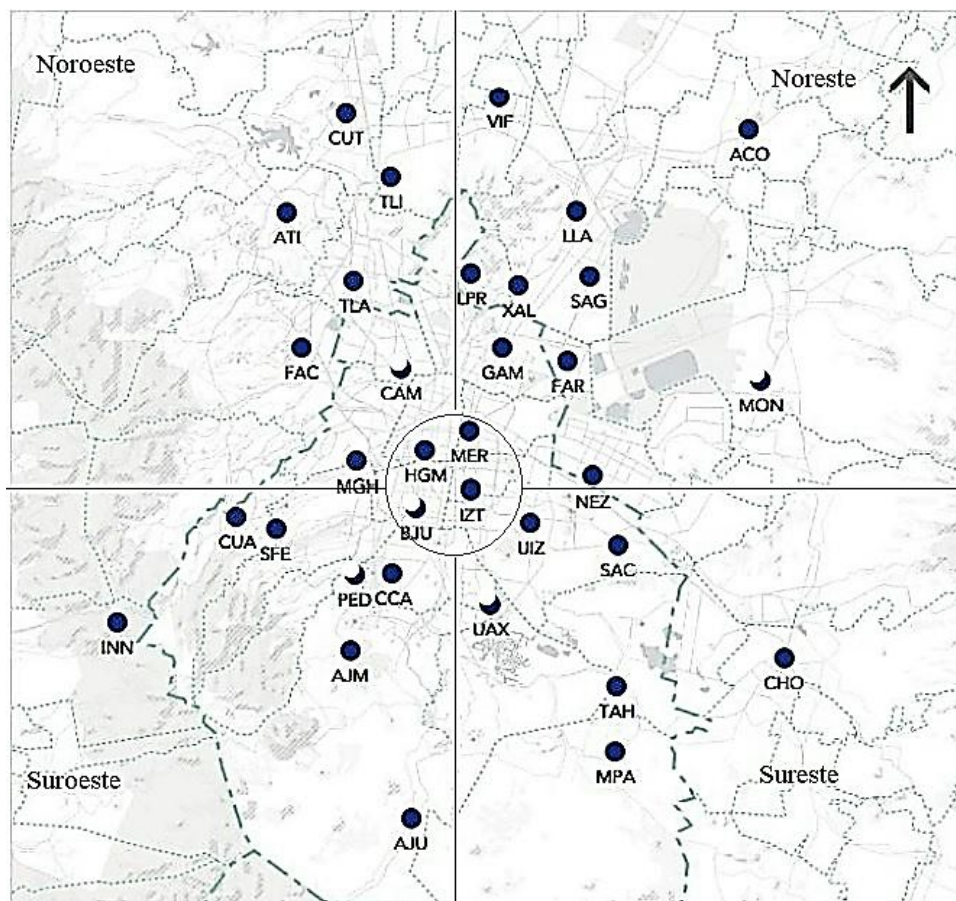


Figura 1: Mapa actual de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) distribuida en el Distrito Federal y estado de México. Fuente: reproducido de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, (SEDEMA, 2024) y modificada en este estudio. Las estaciones analizadas se representan en media luna tono blanco negro.

Equipo de monitoreo automático				
Datos		Malo	Regular	Bueno
Horarios		Insuficiente	Suficiente	Aceptable
Válidos				
		<50%	≥50%; <75%	≥75%
Año	No bisiesto	0 a 4,300	4,340 a 6,520	6,530 a 8,760
Año	Bisiesto	0 a 4,340	4,360 a 6,540	6,570 a 8,784
Mes/día	31	0 a 365	369 a 550	560 a 744
Mes/día	30	0 a 350	360 a 535	540 a 720
Mes/día	28	0 a 330	335 a 500	505 a 672
Mes/día	Bisiesto			
	29	0 a 340	345 a 515	520 a 696

Tabla 1: Categorías de desempeño por año-mes de una estación de monitoreo atmosférico. Fuente: Reproducido de (Correa-García, 2023).

Después, se realizaron análisis de correlación y regresión para examinar la relación del O_3 con los demás contaminantes y variables meteorológicas ya mencionadas, y de esta forma proponer un modelo de regresión lineal que explique los cambios del O_3 . Enseguida, se determinó el coeficiente de correlación de Pearson, que es un índice adimensional localizado entre -1,0 y 1,0, el cual refleja el grado de dependencia lineal entre dos conjuntos de datos. Su fórmula se escribe como.

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Por otra parte, si X e Y son dos variables en cuestión, un diagrama de dispersión muestra la localización de los puntos (X, Y) sobre un sistema rectangular de coordenadas. Si todos los puntos del diagrama parecen estar en una recta, la

correlación es lineal entre las variables; sin embargo, aunque las variables estén relacionadas, no siempre se extienden sobre una línea recta y se dice que es una relación no lineal. Una línea recta, es el tipo más sencillo de una curva de ajuste (Spiegel, 1991) su ecuación puede escribirse:

$$Y = a_0 + a_1X \quad (2)$$

Dados cualesquiera dos puntos (X_1, Y_1) y (X_2, Y_2) sobre la recta, se pueden determinar las constantes a_0 y a_1 . La ecuación así obtenida se puede expresar.

$$Y - Y_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}(X - X_1) \quad (3)$$

Donde

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \quad (4)$$

Se llama la pendiente de la recta y representa el cambio en Y dividido por el correspondiente cambio en X. Cuando la ecuación se escribe en la forma (2), la constante a_1 es la pendiente m. La constante a_0 , que es el valor de Y cuando $X = 0$, se nombra la *Y - intersección*.

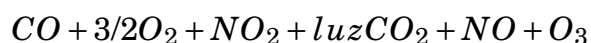
También se realizaron pruebas estadísticas para detectar, si los lotes de datos pertenecen a una distribución normal, y en su caso efectuar el análisis de varianza (ANOVA). Para lograr esto, se utilizó el estadístico Shapiro-Wilks (W); el cual se obtiene en función del valor medio y desviación estándar, calculados a partir de una muestra de datos. Si el estadístico es significativo, entonces la probabilidad de que los datos resulten de una distribución normal podría rechazarse. En caso contrario, se acepta la hipótesis y se efectúa el análisis de varianza (ANOVA) paramétrico. Las medidas de tendencia central que utilizan estos dos análisis son la media aritmética y la mediana respectivamente. Si la muestra de los datos no procede de una población con curva normal, se puede aplicar la prueba (H) de Kruskal-Wallis (Kruskal and Wallis, 1952). Este último análisis, se realizó para detectar diferencias significativas entre las estaciones de monitoreo en estudio, para el mes de mayo y los días de contingencia ambiental del 23 y 25 de mayo, 2024. El software estadístico Infostat versión libre 2008 usado esta investigación, tiene los módulos que efectúan los análisis citados previamente

Resultados

El mejor coeficiente de correlación de Pearson, para ozono hallado en el sitio Pedregal (*PED*), fue con monóxido

de carbono (*CO*) $R=0.90$, $p=0.000$; en Camarones (*CAM*), con los óxidos de nitrógeno (NO_X) $R=-0.56$, $p=0.05$; Benito Juárez (*BJU*), con el dióxido de nitrógeno (NO_2) $R=0.50$, $p=0.04$; Montecillos (*MON*), con humedad relativa (*HR*) $R=-0.42$, $p=0.07$ y en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco (*UAX*), con humedad relativa (*HR*) $R=-0.63$, $p=0.07$.

A partir de estos valores, se plantearon los siguientes modelos; en Pedregal, el O_3 aumenta conforme sube el CO con factor de correlación $R=0.80$; $R^2=0.80$, $p<0.0001$ y error estimado en 0.0005ppm. A pesar de que el modelo no alcanzó a explicar el valor observado de 0.037ppm en 2024 (Figura, 2A), el supuesto podría ser válido porque es parecido al reportado en (Correa-García, 2023); Incluso, el cambio mínimo de 0.033ppm estimado para 2023 por dicho autor, casi coincidió con el promedio anual registrado de 0.034ppm por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) en ese año, mientras que el aporte de CO en la formación de O_3 fue explicado por Caselli, (1992) con la siguiente reacción química.



De esta forma, los cambios observados del O_3 , podrían atribuirse a fuentes móviles, que transitan en los alrededores de la caseta de monitoreo, y porque emiten directamente CO a la atmosfera, favoreciendo la formación de ozono. Conviene señalar que esta caseta fue reubicada en 2005 con la toma de muestra a una altura cercana de 11m sobre el nivel del suelo (Correa-García, 2023). Para el año 2025, el O_3 podría bajar a 0.033ppm (Figura, 2A).

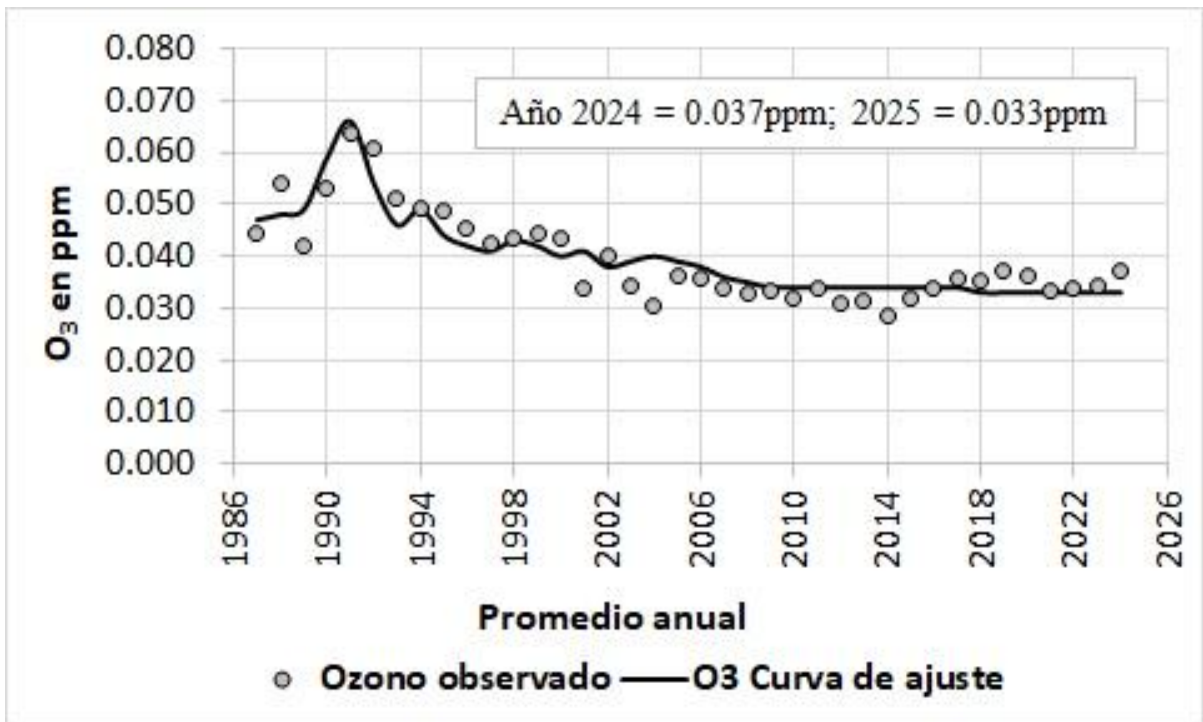
En la estación Camarones el O_3 baja según aumentan los óxidos de nitrógeno

(NO_X) con factor de determinación $R=0.32$; $R^2=0.25$, $p=0.0452$ y error estimado de 0.076ppm. El modelo podría ser válido porque la relación del O_3 con los NO_X fue documentada para la inhabilitada estación de Azcapotzalco y Lagunilla de la ciudad de México en (Correa-García, 2004). De esta forma, la producción de O_3 podría atribuirse también a fuentes móviles de emisión cercanas a la caseta. En este sitio de monitoreo, la altura de la toma de muestra es de 9m, sobre el nivel del suelo (SEDEMA, 2012) y se encuentra relativamente cerca unos 500m, de la Av. Cuitláhuac; donde años atrás, estuvo instalada la caseta de Cuitláhuac, que solamente medía CO . Así que Camarones, podría considerarse como reemplazo actual de la inhabilitada caseta de Cuitláhuac en 1993. En 2025, el O_3 podría bajar a 0.027ppm (Figura, 2B).

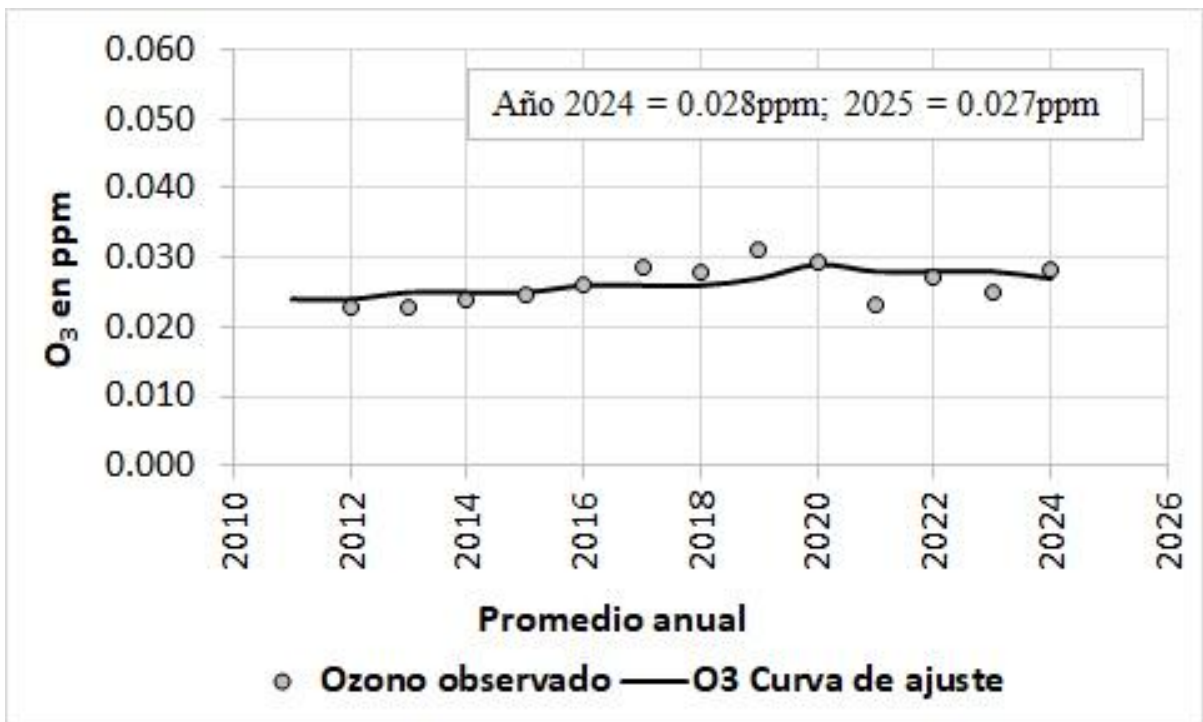
Para la estación Benito Juárez el O_3 aumenta conforme se incrementa el dióxido de nitrógeno (NO_2) con factor de determinación $R=0.25$; $R^2=0.20$, $p=0.0428$ y error estimado de 0.146ppm. El modelo podría ser válido, porque es parecido al reportado en (Correa-García, 2004), para la estación de Xalostoc (XAL) que está ubicada en Ecatepec estado de

México (Figura, 1). Además, el dióxido de nitrógeno (NO_2) que es emitido a la atmosfera principalmente por la industria y fuentes móviles, sobre todo las que utilizan gasolina diésel Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2020); es también precursor del O_3 , y el efecto en la salud de este contaminante ha evidenciado un aumento en la mortalidad total y por causas cardiovasculares y respiratorias cuando se incrementan los niveles de ozono (Borja-Aburto *et al*, 1997). De manera similar el aumento de NO_2 , coincide con la agravación de síntomas de padecimientos respiratorio, circulatorio, cardiovascular y también con el incremento en la mortalidad (Farías *et al.*, 2017). Así que la producción de O_3 podría atribuirse a fuentes móviles que transitan en los alrededores de la caseta de monitoreo.

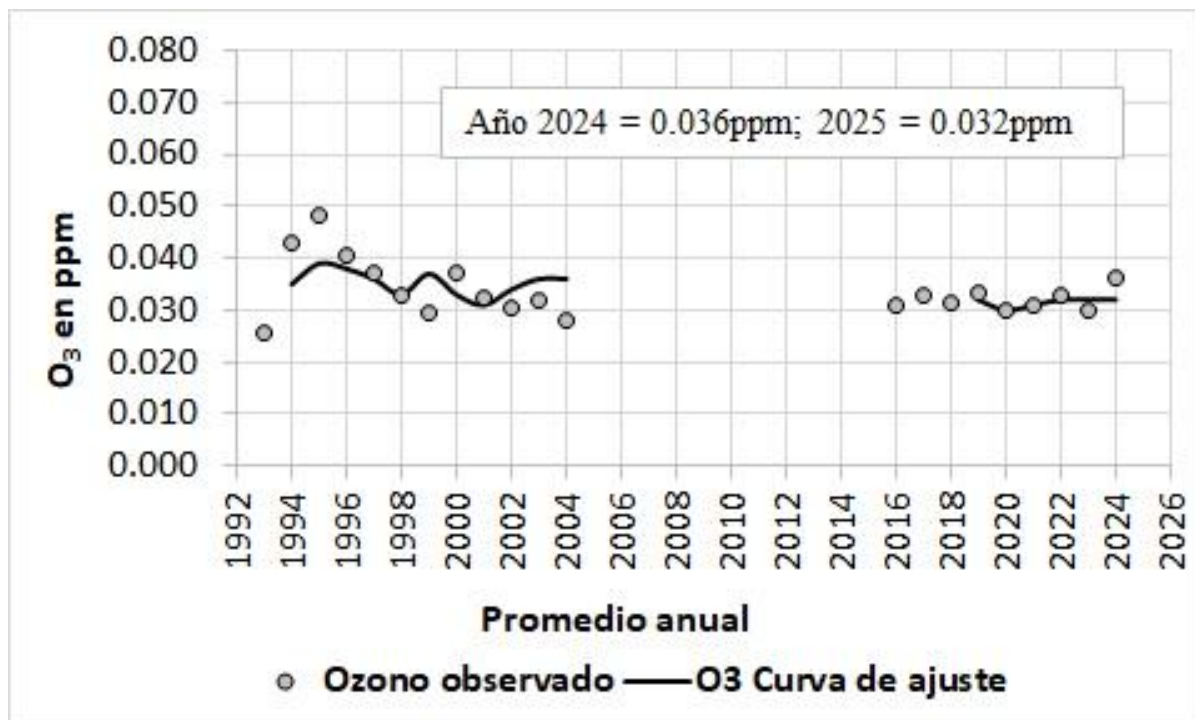
Es importante mencionar, que dicha caseta, quedo fuera de servicio en 2004 (Correa-García *et al.*, 2012); pero en 2016 fue reubicada y modernizada, con la altura de la toma de muestra alrededor de 20m sobre el nivel del suelo, en la misma área deportiva de la Alcaldía Benito Juárez (SEDEMA, 2018). Para 2025, el O_3 podría bajar a 0.032ppm (Figura, 2C).



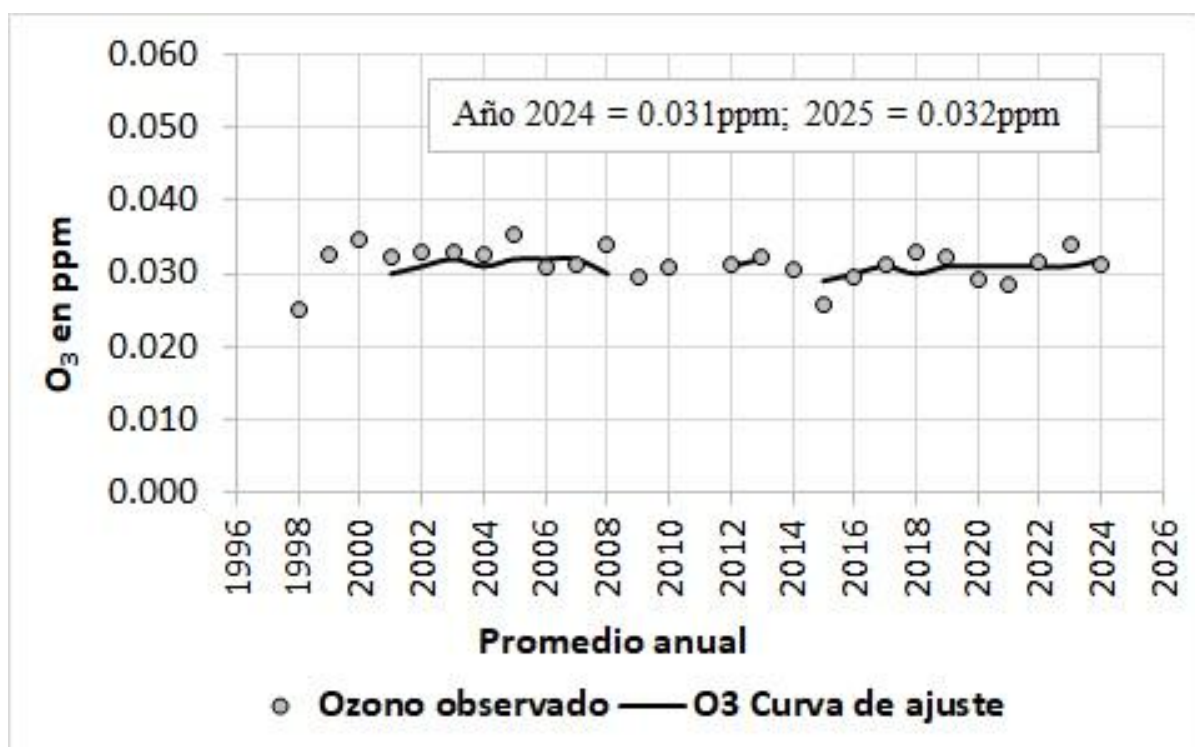
Gráfica (A) Pedregal



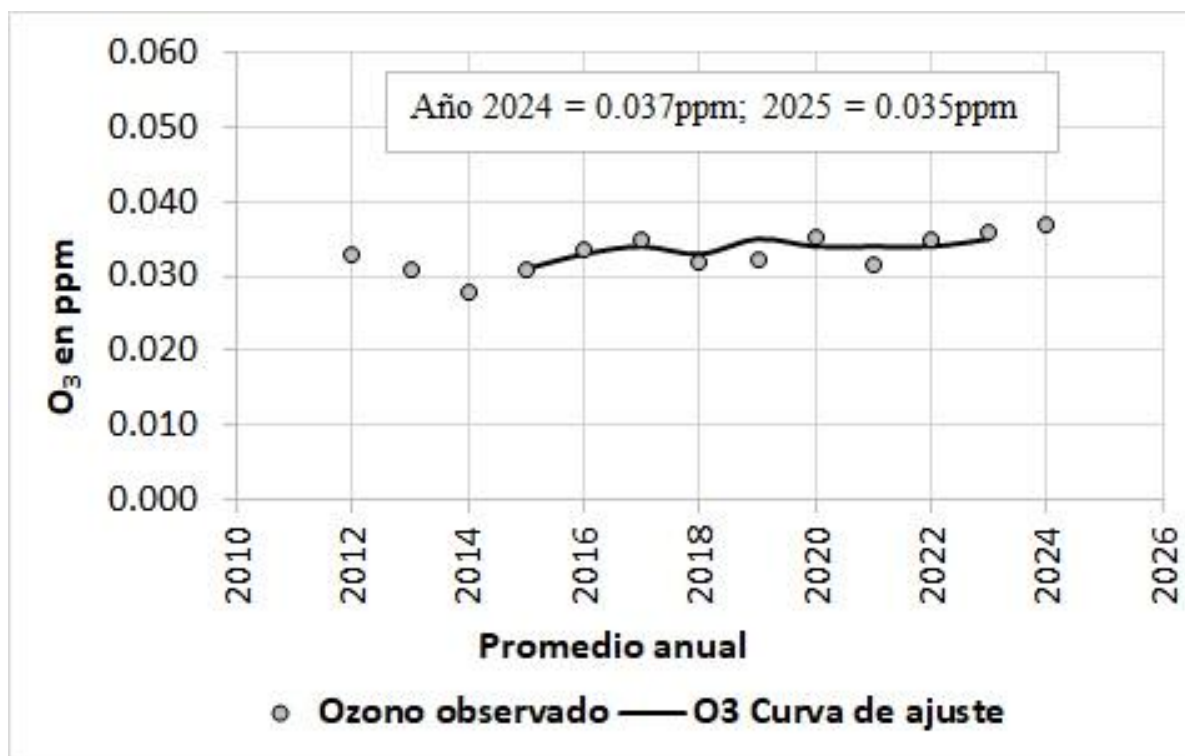
Gráfica (B) Camarones



Gráfica (C) Benito Juárez



Gráfica (D) Montecillos



Gráfica (E) UAX

Figura 2. Modelo de regresión para ozono y valor estimado para el año 2025 en varios sitios de monitoreo de la RAMA de la ciudad de México.

En la estación Montecillos, antes nombrada Chapingo el O_3 baja conforme sube la humedad relativa con factor de determinación $R=0.17$; $R^2=0.13$ y $p=0.0669$. No obstante, la no significancia de la variable, el supuesto podría ser correcto, debido a que la asociación de la humedad relativa y otras variables meteorológicas con ozono ha sido documentada en (Fast & Zhong, 1998 en Correa-García, 2004). Además, la caseta se ubica en una zona rural en el campo agrícola experimental al nivel del suelo, del Colegio de Posgraduados de la Universidad de Chapingo, por la carretera México-Texcoco Km 36.5 Montecillos (Correa-García *et al.*, 2012). Para el 2025 el O_3 podría subir a 0.032ppm (Figura, 2D).

En la estación Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, también el O_3 baja conforme sube

la humedad relativa con factor de determinación $R=0.39$; $R^2=0.31$ y $p=0.0708$. No obstante, la no significancia de la variable, el supuesto podría ser correcto y la explicación es la misma que se abordó anteriormente en la estación Montecillos. Pero con la diferencia de que la altura de la toma de muestra es de alrededor de 20m sobre el nivel del suelo (SEDEMA, 2018). Para el 2025 el O_3 podría bajar a 0.035ppm (Figura, 2E).

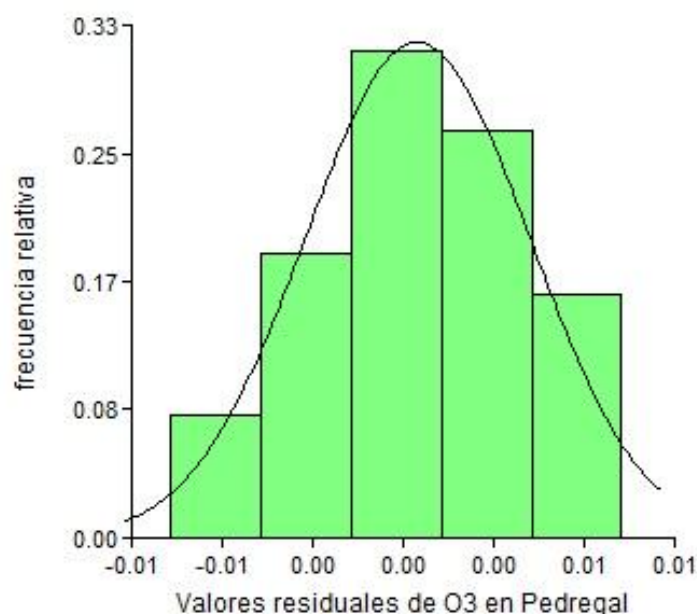
Discusión

Los coeficientes de correlación fueron aceptables en Pedregal y Benito Juárez, en Camarones estuvo por debajo de $R=0.5$, mientras que en Montecillos y la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, fue menor a $R=0.4$ y no significativos. A pesar de esto, los valores estimados en ambos sitios describieron curvas de ajuste aceptables

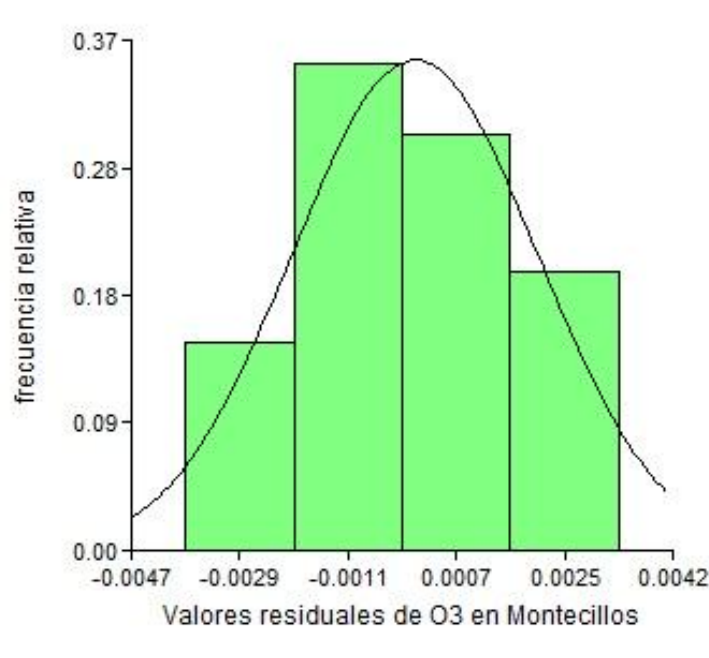
(Figura, 2D-E), junto con los demás sitios de muestreo (Figura, 2A-B y C). Asimismo, la (Figura, 3) presenta los valores residuales de O_3 , los cuales indicaron que en Pedregal y Montecillos se ajustaron bien a una distribución normal (Figura, 3A-B). Estos resultados fueron parecidos con los otros modelos propuestos, pero no se asignan en ningún apartado debido a lo amplio y extenso del estudio. Por otra parte, la (Tabla, 2) presenta el resumen estadístico de las concentraciones por año-mes, y del 20 al 31 de mayo, que incluye, la fase I y la contingencia ambiental declarada el 23 y 25 de mayo respectivamente por la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME, 2024-2024a).

Como se puede apreciar, al nivel de año el muestreo fue suficiente en BJU, CAM

y UAX (Tabla, 2A); pero al nivel mensual, el monitoreo ahora fue suficiente en CAM, MON y PED (Tabla, 2B). En cambio, al tomar la serie de tiempo del 20 al 31 de mayo, el sitio CAM quedó eliminado, debido al muestreo por debajo del 50% y BJU, MON y PED tuvieron un muestreo regular (Tabla, 2C); quedando solamente la UAX con un monitoreo aceptable. No obstante, lo anterior, el promedio anual de O_3 de 0.036ppm en BJU (Tabla, 2A), se aproximó bien al valor observado de 0.038ppm en el 2000 reportado en (Correa-García, 2004), mientras que la cifra de 0.037ppm en PED (Tabla, 2A), fue ligeramente superior al promedio anual de 0.036ppm observado en los años 2005-2006, 2017 y 2020, pero igual al registrado en el año 2019 de 0.037ppm documentado en (Correa-García, 2023).



Gráfica (A) Pedregal



Grafica (B) Montecillos

Figura 3. Histogramas de los valores residuales obtenidos del modelo anual de O_3 en dos sitios de monitoreo de la RAMA.

Más aun, el promedio mensual de superior al promedio de 0.063ppm de O_3 visto en PED (Tabla, obtenido en mayo de 1990; pero igual con 2B), coincidió con los observados en abril de 1990 con 0.064ppm informado mayo de 1987-88 y fue ligeramente en (Correa-García, 2023).

Estación de monitoreo/zona	BJU	CAM	MON	PED	UAX	BJU	CAM	MON	PED	UAX
	Centro	Noroeste	Noreste	Suroeste	Sureste	Centro	Noroeste	Noreste	Suroeste	Sureste
Núm. Datos	6,167	6,306	6,618	7,207	6,012	624	466	539	533	625
Valor Medio	0.036	0.028	0.031	0.037	0.037	0.059	0.050	0.053	0.064	0.064
Desvest	0.033	0.030	0.027	0.030	0.033	0.038	0.040	0.031	0.036	0.040
Mediana	0.027	0.016	0.025	0.028	0.026	0.054	0.043	0.054	0.055	0.060
Valor mínimo	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.006	0.004
Valor máximo	0.165	0.155	0.134	0.171	0.176	0.160	0.155	0.125	0.168	0.174
Muestreo en %	70	72	75	82	68	84	63	72	72	84
Año 2024 = 8,784 datos (A)						Mayo 2024 = 744 datos (B)				
Estación de monitoreo/zona	BJU	CAM	MON	PED	UAX					
	Centro	Noroeste	Noreste	Suroeste	Sureste					
Núm. Datos	181	92	183	176	229					
Valor medio	0.057	0.045	0.048	0.063	0.062					
Desv. Est	0.040	0.038	0.034	0.038	0.042					
Mediana	0.050	0.037	0.047	0.053	0.051					
Valor mínimo	0.003	0.001	0.001	0.010	0.004					
Valor máximo	0.152	0.125	0.112	0.160	0.174					
Muestreo en %	63	32	64	61	80					
Mayo 20-31 2024 =288 datos (C)						Nota: Para interpretar los tonos véase la (Tabla, 1)				

Tabla 2: Resumen estadístico del promedio por año-mes y la contingencia ambiental por O_3 declarada el 23 y 25 de mayo 2024 en el Valle de México.

Esta última descripción, podría corroborar la tendencia regresiva del ozono a valores observados en la última década de los años noventa del siglo pasado, e inicios del nuevo milenio reportado en (Correa-García, 2023). Por otra parte, los resultados obtenidos del ANOVA no paramétrico podrían confirmar que la contaminación por O_3 en mayo 2024, fue más alta en el corredor sureste-suroeste e intermedia en el centro de la ciudad y estado de México por el rumbo a Texcoco (Tabla, 3A, Figura, 1), siendo menos contaminada la zona noroeste de la ciudad de México (CAM). En cambio, la evaluación del 20 al 31 de mayo, se redujo a 4 estaciones de monitoreo, por la eliminación del sitio CAM, debido a la insuficiencia de datos <50%, quedando el estado de México (MON) bien diferenciado con menos contaminación; en tanto que, el centro (BJU), sureste (UAX) y suroeste (PED) del área metropolitana de la ciudad de México, la contaminación fue alta y homogénea en dichos sitios (Tabla, 3B, Figura, 1); nótese que el muestreo a este nivel, predominó como suficiente, tal como se describió para la (Tabla, 2). Esta última descripción, sugiere que aún en las contingencias ambientales podrían faltar datos, o discontinuidad en las mediciones de O_3 .

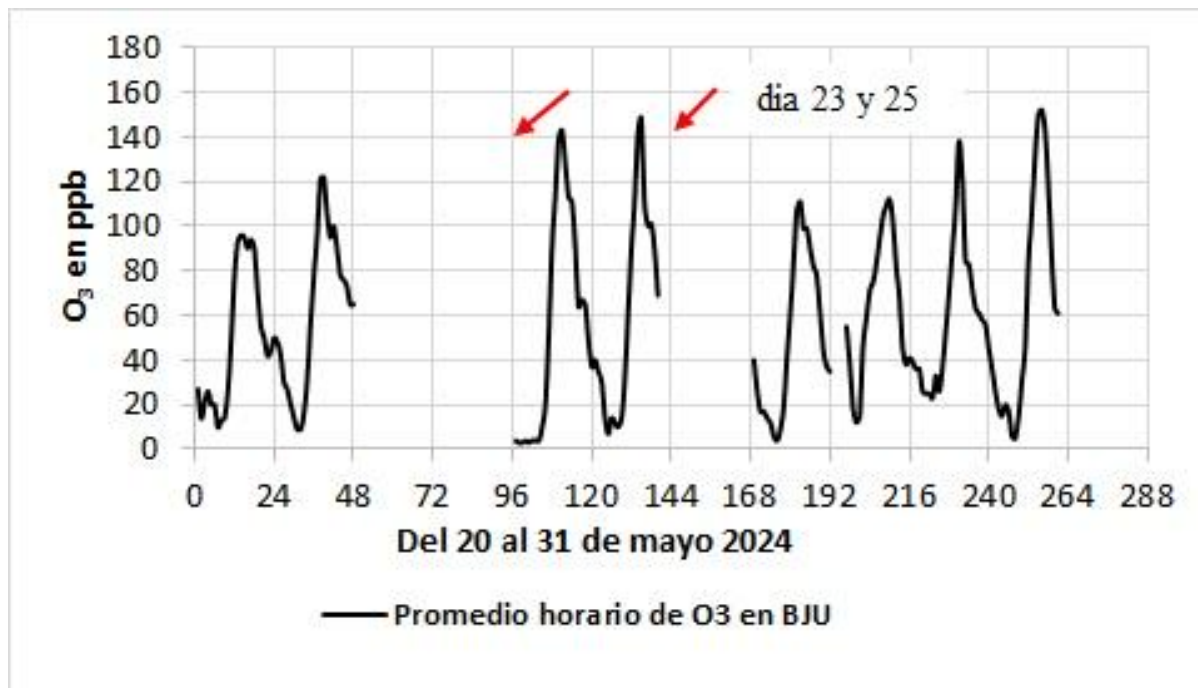
Por ejemplo, la (Figura, 4) presenta las concentraciones horarias de O_3 del

20 al 31 de mayo, 2024, que incluye los días de la contingencia el 23 y 25 de mayo (indicado con flechas). En términos generales, se puede observar la discontinuidad de mediciones de O_3 antes y durante los eventos en 3 de 4 sitios de monitoreo (Figura, 4A, B y C); siendo la UAM Xochimilco, el sitio donde se alcanzó el valor máximo de 0.174ppm el día 25 reportado por la (CAME, 2024a). Pese a esto, faltaron datos el día 24 de mayo (Figura, 4D). Este vacío de datos se debió a la eliminación de los valores -99 que son comunes hallarlos en las bases de datos de la RAMA (Correa-García, 2004); su eliminación, forman parte del proceso de validación empleado en este estudio, pues indican que no hubo registro. Sin embargo, estas interrupciones, podrían enmascarar la causa de los datos faltantes, como una falla, mantenimiento o calibración del equipo de monitoreo, y su efecto en las siguientes mediciones.

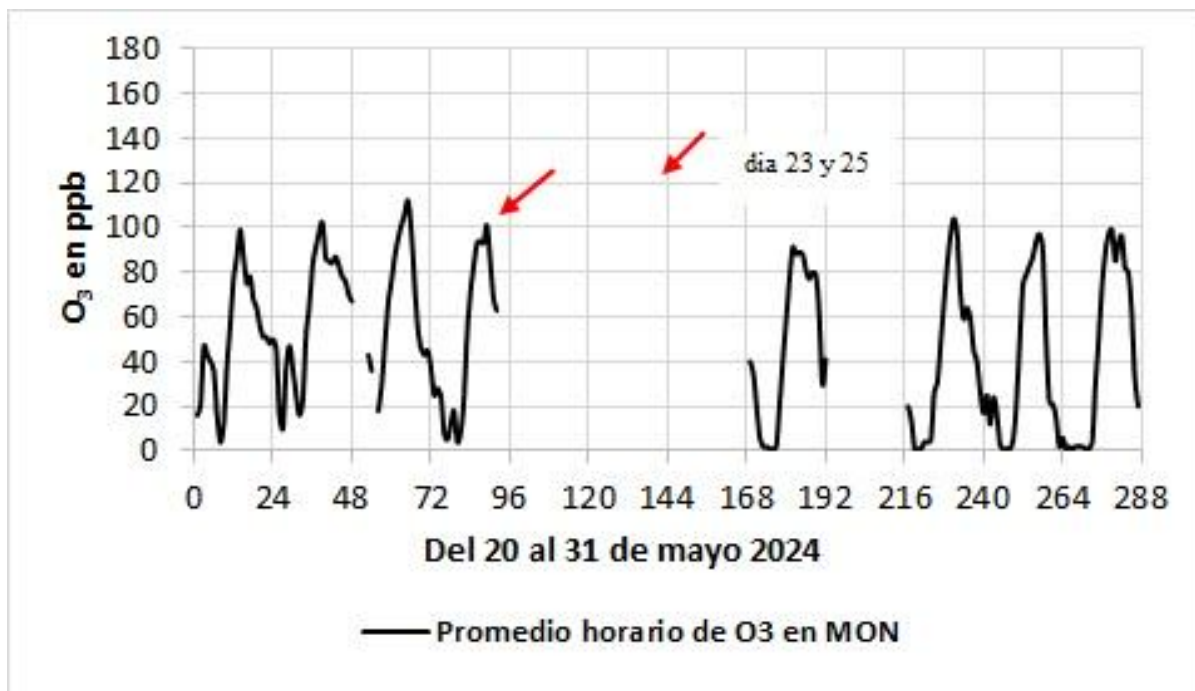
Es decir, que las circunstancias de ¿cómo se genera la información de la RAMA? se encuentra en la base de datos cruda, la cual no es compartida, porque su uso es de control interno, y la base de datos publica está disponible en <http://www.calidadaire.df.gob.mx.>, porque no contiene dicha información. Por ende, los resultados obtenidos en este estudio es lo más cercano a la realidad.

Estación de monitoreo/zona	BJU Centro	CAM Noroeste	MON Noreste	PED Suroeste	UAX Sureste	BJU Centro	CAM Noroeste	MON Noreste	PED Suroeste	UAX Sureste
Núm. Datos	6,167	6,306	6,618	7,207	6,012	624	466	539	533	625
Valor Medio	0.036	0.028	0.031	0.037	0.037	0.059	0.050	0.053	0.064	0.064
Desvest	0.033	0.030	0.027	0.030	0.033	0.038	0.040	0.031	0.036	0.040
Mediana	0.027	0.016	0.025	0.028	0.026	0.054	0.043	0.054	0.055	0.060
Valor mínimo	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.001	0.006	0.004
Valor máximo	0.165	0.155	0.134	0.171	0.176	0.160	0.155	0.125	0.168	0.174
Muestreo en %	70	72	75	82	68	84	63	72	72	84
Año 2024 = 8,784 datos (A)					Mayo 2024 = 744 datos (B)					
Estación de monitoreo/zona	BJU Centro	CAM Noroeste	MON Noreste	PED Suroeste	UAX Sureste					
Núm. Datos	181	92	183	176	229					
Valor medio	0.057	0.045	0.048	0.063	0.062					
Desv. Est	0.040	0.038	0.034	0.038	0.042					
Mediana	0.050	0.037	0.047	0.053	0.051					
Valor mínimo	0.003	0.001	0.001	0.010	0.004					
Valor máximo	0.152	0.125	0.112	0.160	0.174					
Muestreo en %	63	32	64	61	80					
Mayo 20-31 2024 =288 datos (C)					Nota: Para interpretar los tonos véase la (Tabla, 1)					

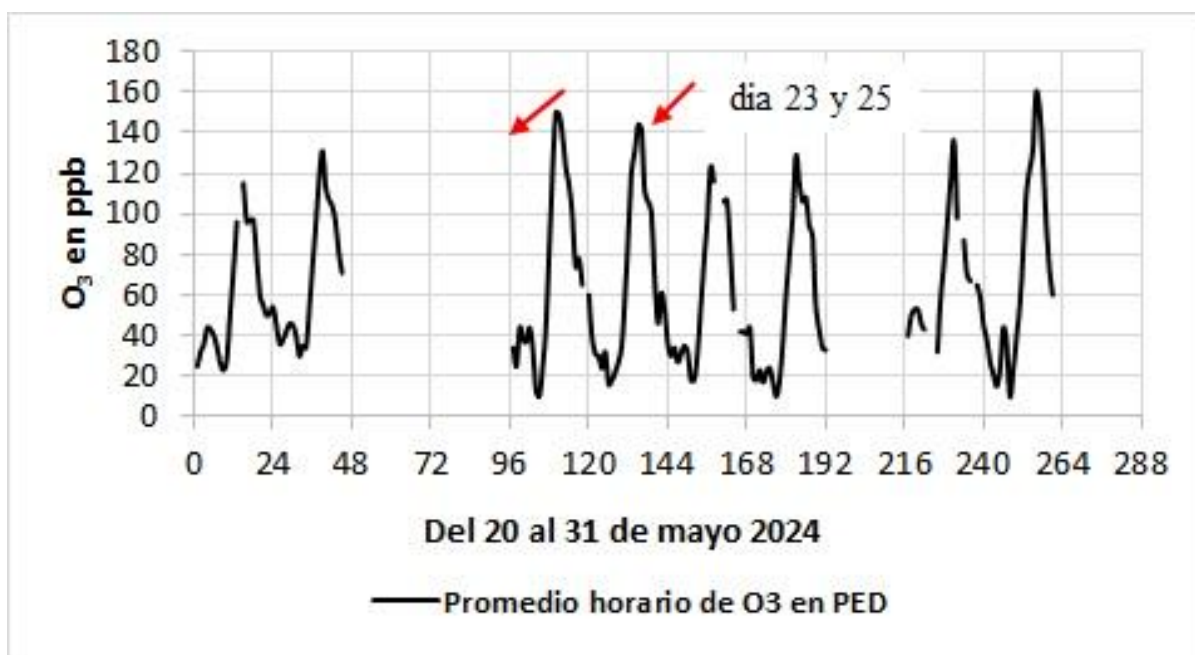
Tabla 3: Resumen ANOVA no paramétrico Kruskal-Wallis para detectar cambios en la mediana mensual de O_3 en ppm entre sitios de muestreo de la ciudad de México y estado de México. Los sitios en diferentes casillas son distintos con nivel de significación mínimo de 99%.



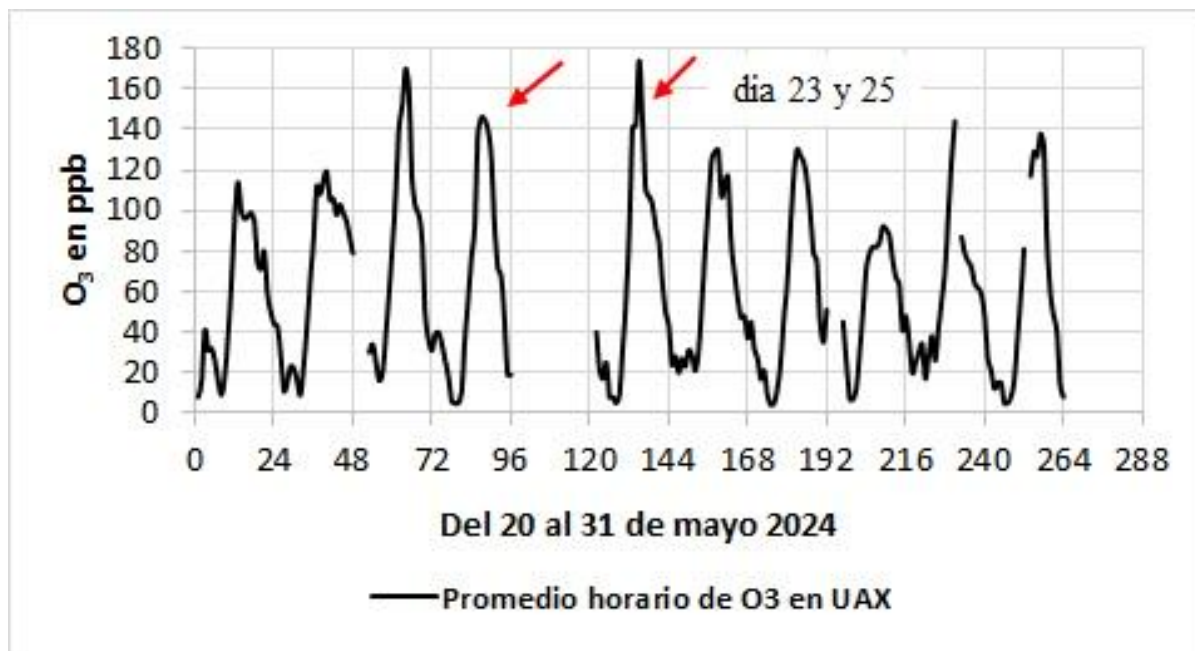
Gráfica (A) Benito Juárez



Gráfica (B) Montecillos



Gráfica (C) Pedregal



Gráfica (D) UAM Xochimilco

Figura 4. Contingencia Ambiental en la ZMVM por O_3 declarada por la Comisión Ambiental de la Megalópolis el 23 y 25 de mayo, 2024 a las 20:00hrs y 14:00hrs respectivamente de la Ciudad de México.

Por ello, la falta de datos deriva en dudas sobre la veracidad del evento y originan una guía incierta sobre los efectos del O_3 en la salud pública, tal como ocurrió en el pasado, con la contingencia ambiental decretada el 30-31 de diciembre en 1992 y 18-19 de septiembre en el año 2002, las cuales fueron documentadas en (Correa-García, 2004).

Conclusiones

La contaminación por ozono en la estación Pedregal, al suroeste de la ciudad de México bajó 17% (0.037ppm) en 2024 con respecto al valor registrado de 0.044ppm en 1987, pero se advierte de un incremento sostenido de 28% en los últimos 10 años, con tendencia regresiva a promedios anuales observados al inicio del nuevo milenio. El promedio alcanzado en mayo 2024 de 0.064ppm, mostró una marcada regresión a los valores registrados, desde que se inició el monitoreo a fines de la década de los años 80' del siglo pasado.

La contaminación por ozono en la estación Benito Juárez (Centro) subió 41% (0.036ppm) en 2024, con respecto al valor registrado de 0.026ppm en 1993. También mostró tendencia regresiva a concentraciones anuales observadas a finales de la década de los años 90' del siglo pasado e inicio del nuevo milenio. Por lo que esta y la descripción anterior, podrían ser un indicador de que la contaminación por ozono otra vez representa un problema ambiental en la capital del país.

La contaminación por ozono en la estación Camarones (Noroeste) aumentó 22% (0.028ppm) en 2024, con respecto al valor registrado de 0.023ppm en 2012. En la estación Chapingo /Montecillos, al noreste de la ciudad, en el estado de México subió 24% (0.031ppm) con respecto al valor observado de 0.025ppm en 1998. En la estación Universidad Autónoma Metropolitana

Unidad Xochimilco, al sureste de la ciudad subió 11% (0.037ppm) con respecto al valor registrado de 0.033ppm en 2012.

Los factores que influyeron en las concentraciones de O_3 , según los diferentes periodos de tiempo, fueron principalmente la humedad relativa, óxidos de nitrógeno (NO_X), dióxido de nitrógeno (NO_2) y monóxido de carbono (CO), los cuales parecen razonables según la ubicación de las estaciones de monitoreo, mientras que la altura de la toma de muestra en un rango del nivel del suelo hasta los 20m de altura, no parecen tener influencia en los niveles de O_3 .

Los valores de O_3 esperados al 2025, no están exentos de fallar, debido a la discontinuidad en las mediciones, los procesos de mantenimiento y calibración de los analizadores de O_3 , pero pueden considerarse como una guía de referencia.

La interrupción en las mediciones de O_3 antes y durante las emergencias ambientales, al menos en cinco estaciones de monitoreo, podrían proporcionar una guía efímera sobre los efectos adversos del O_3 en la salud pública. Se recomienda a las autoridades encargadas del monitoreo atmosférico, garantizar la confiabilidad de la información.

Agradecimientos

A la Dra. Georgina Carbajal de la Torre, de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y al Dr. Enrique Rico Arzate, de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industria Extractiva ESIQIE del Instituto Politécnico Nacional. Por sus comentarios y sugerencias en este

estudio.

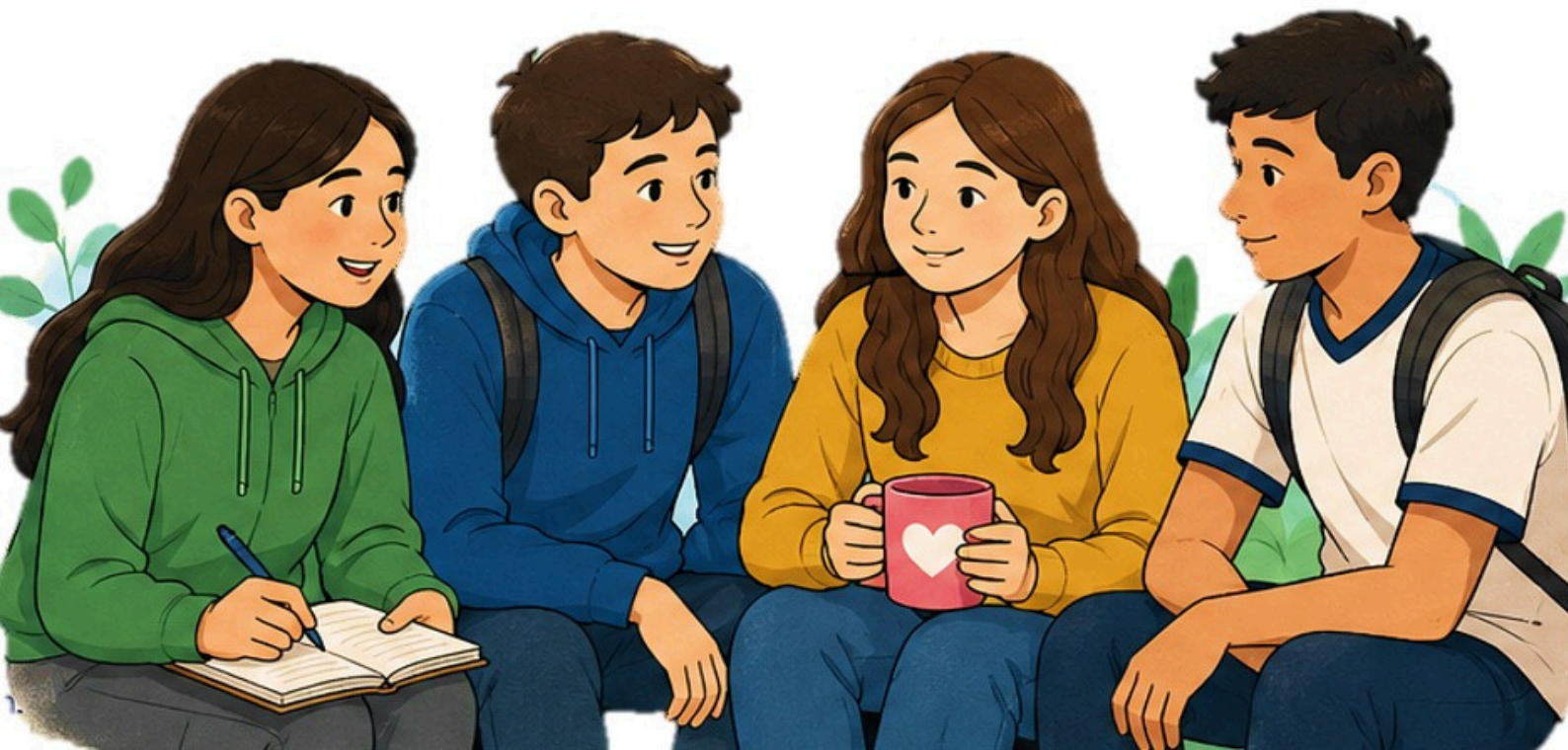
Referencias

- [1] Balzarini MG, González L, Tablada M, Casanoves F, Di Rienzo JA, Robledo CW (2008). Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- [2] Borja-Aburto, V., Loomis, D., Bangdiwala, S. Shy, C., Rascon-Pacheco, R. Ozone, Suspended Particulates, and Daily Mortality in Mexico City, American Journal of Epidemiology, 1997; 145: 258-268
- [3] Caselli, M. (1992). La Contaminación Atmosférica. Causas y fuentes. Efectos sobre el clima, la vegetación y los animales. Siglo XXI Editores. México, DF, México.
- [4] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2020). Efectos de las cuarentenas y restricciones de actividad relacionadas con el COVID-19 sobre la calidad del aire en las ciudades de América Latina y el Caribe. Pp. 1-12., Julio del 2020 Copyright © Naciones Unidas, 2020. <http://www.cepal.org>.
- [5] Comisión Ambiental de la Megalópolis CAME. (2024a). Se activa contingencia ambiental atmosférica por ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Comunicado de Prensa 25 de mayo, 2024 14:00hrs. <https://www.gob.mx/comisionambiental/prensa/se-activa-contingencia-ambiental-atmosferica-por-ozono-en-la-zona-metropolitana-del-valle-de-mexico-zmvm-366013>

- [6] Comisión Ambiental de la Megalópolis CAME. (2024). Se mantiene la Fase I de contingencia ambiental atmosférica por ozono en la ZMVM. Comunicado de Prensa 23 de mayo, 2024 20:00hrs.
- [7] Correa-García, A. (2023). Evaluación de ozono y temperatura al suroeste de la ciudad de México. *Conciencia Tecnológica*. Número 66, Julio-diciembre 2023. Publicado en Mayo, 2024. Pp. 23-33 <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94477589003>
- [8] Correa-García, Rico A, Coronado M. (2012). Análisis y Evaluación de la Contaminación del Aire del Valle de México. Un cuarto de siglo monitoreando la atmósfera de la Cuenca de México. Julio 17, 2012. Pp. 307. Editorial Académica Española. Printed in the U.K. ISBN: 978-3-659-02520-4.
- [9] Correa-García, A. (2004). Contaminantes Atmosféricos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Universidad Autónoma Metropolitana Instituto Politécnico Nacional. Pp. 280. Impreso en México, DF. México. Primera edición 2004. Primera reimpresión Noviembre, 2009. ISBN 970-36-0349-2, ISBN 970-36-0199-5
- [10] Enciso, L. A. (2024). Activan la contingencia ambiental número 11 del año en el valle de México. Publicado el 31 de mayo 2024 09:30 <https://www.jornada.com.mx/autores/ang%c3%a9licaencisol>. <https://www.jornada.com.mx/noticia/2024/05/31/capital/activan-la-contingencia-ambiental-numero-11-del-ano-en-el-valle-de-mexico-4782>
- [11] Farias A, Hoek G, Monteiro A. Effects of NO₂ exposure on daily mortality in Sao Paulo, Brazil. *Environ Res.* 2017; 159:539-44. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.041>
- [12] Fast, Jérôme D. y Shiyuan Zhong. (1998). "Meteorological factors associated with inhomogeneous ozone concentrations in the Mexico City basin", *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, núm. D15, pp. 18,927-18,946.
- [13] Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. (PROAIRE, 2002-2010). Comisión Ambiental Metropolitana.
- [14] Riveros, G.H. (2016). "Contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México" *Ciencia*, núm. 4., volumen 68 • octubre-diciembre de 2016. Pp. 86-87. Correspondencia. Carta al editor de la revista *Ciencia*
- [15] Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal (SMADF). Gobierno de México. Bases de datos públicos. Disponible en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27YqBhnmI=%27>
- [16] Secretaria del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2024). Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2021. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire. Disponible en <http://www.calidadaire.df.gob.mx>.
- [17] Secretaria del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2018). Sistema de monitoreo atmosférico de la ciudad de

- México. Ambient Air Quality Monitoring Audit Repor. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. 2018, Pp. 72. Mexico City Audit 2018. Disponible en <http://www.calidadaire.df.gob.mx>.
- [18] Secretaria del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA). (2012). Audit of ambiente air monitoring stations for the sistema de monitoreo atmosférico de la ciudad de México. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. 2012, Pp. 57. Mexico City Ambient Air Monitoring Audit 2012. Disponible en <http://www.calidadaire.df.gob.mx>.
- [19] Spiegel, Murray, R. (1991) Estadística. Segunda Edición. Editorial McGraw-Hill. Impreso en España.
- [20] Xu Li Owen. (2021). Relationship Between Air Quality and the Number of Acute Respiratory Disease Infections in Mexico City. IJRP 2021, 81(1), 15-22; doi: .10.47119/IJRP100811720212118

Salud mental del personal docente de Educación Media Superior ante los retos de las adecuaciones curriculares en la Nueva Escuela Mexicana.



Dr. M. A. Flores Mejia

Centro de Estudios Tecnológicos del Mar No.18. Acapulco,
Gro.

Dr. R. González Cruz

Centro de Bachillerato Tecnológico y Agropecuario No.185.
San Miguel la Toma, Puebla.

Abstract

The implementation of the curricular adjustments proposed by the Nueva Escuela Mexicana (NEM) has brought about profound transformations in the educational practices of upper secondary education (EMS) teachers. This article analyzes how these changes have impacted teachers' mental health, considering factors such as increased workload, professional uncertainty, and the constant need for updating. The results of a qualitative study with teachers from various EMS subsystems are presented, exploring their perceptions, emotions, and coping strategies. The study seeks to highlight the need for emotional support and institutional assistance during educational change processes.

The methodology followed a quantitative, descriptive approach. A structured survey was applied to upper secondary teachers from the DGETAYCM. The questionnaire included Likert-type scales to assess perceptions regarding emotional burden, institutional support, clarity in communication, and pedagogical adaptation. The data were analyzed statistically to identify trends, correlations, and areas for improvement. Informed consent, confidentiality, and instrument validity were ensured through a pilot test.

The study's results revealed that the implementation of the Nueva Escuela Mexicana has generated a significant workload and emotional burden on upper secondary teachers. Although some institutional support is perceived, it is insufficient in meeting the real needs for accompaniment. Despite the professional commitment shown, feelings of exhaustion, uncertainty, and ambivalence toward the model persist. The study concludes that the

success of the reform depends on a comprehensive strategy that prioritizes both pedagogical training and the emotional well-being of teachers, with structures that are sensitive to the school context.

Keywords: Mental health, teachers, higher secondary education and NEM.

Resumen

La implementación de las adecuaciones curriculares propuestas por la Nueva Escuela Mexicana (NEM) ha supuesto transformaciones profundas en la práctica educativa del personal docente de Educación Media Superior (EMS). Este artículo analiza cómo estos cambios han impactado la salud mental de los docentes, considerando factores como el aumento de carga laboral, incertidumbre profesional y necesidad de actualización constante. Se presentan los resultados de una investigación cualitativa con docentes de distintos subsistemas de EMS, explorando percepciones, emociones y estrategias de afrontamiento. El estudio busca visibilizar la necesidad de acompañamiento emocional y propuestas de apoyo institucional durante los procesos de cambio educativo.

La metodología se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo. Se aplicó una encuesta estructurada a docentes de educación media superiores pertenecientes a la DGETAYCM. El cuestionario incluyó escalas tipo Likert para medir la percepción sobre carga emocional, apoyo institucional, claridad en la comunicación y adecuación pedagógica. Los datos se analizaron estadísticamente para identificar tendencias, correlaciones y áreas de mejora. Se garantizó el consentimiento

informado, la confidencialidad y la validez del instrumento mediante prueba piloto.

Los resultados del estudio revelaron que la implementación de la Nueva Escuela Mexicana ha generado una fuerte sobrecarga laboral y emocional en docentes de nivel medio superior. Aunque se percibe cierto apoyo institucional, este es insuficiente frente a las necesidades reales de acompañamiento. Pese al compromiso profesional mostrado, persisten sentimientos de agotamiento, incertidumbre y ambivalencia ante el modelo. Se concluye que el éxito de la reforma depende de una estrategia integral que priorice tanto la capacitación pedagógica como el bienestar emocional del profesorado, con estructuras sensibles al contexto escolar.

Palabras clave: Salud mental, docentes, educación media superior y NEM.

Introducción

La Nueva Escuela Mexicana plantea un enfoque educativo centrado en el humanismo, la equidad y la formación integral del estudiante. Para lograrlo, se han diseñado nuevas adecuaciones curriculares que transforman los contenidos, métodos de enseñanza y formas de evaluación. Aunque estas reformas buscan mejorar la calidad educativa, su implementación ha generado un impacto significativo en los docentes de Educación Media Superior, quienes enfrentan presiones para adaptarse en plazos breves, con recursos limitados y muchas veces sin el acompañamiento adecuado. En este contexto, es fundamental analizar cómo estos retos afectan su salud mental y bienestar.

La salud mental del personal docente es un factor determinante en la calidad educativa, el clima laboral y la eficacia de los procesos de enseñanza-aprendizaje. Diversas investigaciones han señalado que el entorno educativo, especialmente cuando está en constante transformación, puede impactar negativamente en el bienestar emocional del profesorado (Álvarez-García *et al.*, 2020).

Los modelos educativos que promueven un cambio curricular significativo, como ha ocurrido en México con la implementación de la Nueva Escuela Mexicana (NEM), representan un desafío complejo para los docentes de EMS. Estos cambios requieren una rápida adaptación a nuevas metodologías, tecnologías educativas y criterios de evaluación, lo que puede generar estrés laboral, ansiedad, agotamiento emocional y sentimientos de desbordamiento profesional (López-Cabarcos *et al.*, 2021; Barragán *et al.*, 2023).

La teoría del estrés laboral de Karasek (1979) es útil para comprender este fenómeno, ya que plantea que altos niveles de exigencia combinados con bajo control o poca autonomía provocan altos niveles de tensión y desgaste. En este contexto, los docentes enfrentan un aumento de la carga administrativa, ambigüedad de roles, escasa capacitación y, en algunos casos, falta de apoyo institucional, lo cual puede derivar en síntomas de agotamiento, desmotivación y desgaste profesional o burnout (Maslach & Leiter, 2016).

Asimismo, el modelo de demandas y recursos laborales (Demerouti *et al.*, 2001) destaca que cuando las demandas del trabajo superan los

recursos personales y organizacionales disponibles, el equilibrio psicoemocional del trabajador se ve comprometido. Esta situación es frecuente en procesos de transición curricular, donde los docentes deben cumplir con nuevas exigencias sin recibir el acompañamiento formativo ni emocional adecuado (Sánchez-Hernández & Arcos-Vega, 2022).

Los efectos negativos en la salud mental docente también pueden reflejarse en su desempeño profesional, relaciones interpersonales, sentido de pertenencia institucional y permanencia en el sistema educativo. Por tanto, es indispensable que los nuevos modelos pedagógicos se diseñen e implementen considerando mecanismos de apoyo emocional, capacitación continua y espacios de participación para los educadores (Organización Mundial de la Salud, 2022; INEE, 2019), la promoción del bienestar mental en el ámbito escolar no solo debe atender al estudiante, sino que debe incluir políticas que visibilicen y fortalezcan la salud psicoemocional del profesorado, garantizando condiciones laborales dignas, reconocimiento profesional y una gestión del cambio pedagógico inclusiva y gradual (UNESCO, 2021).

Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo fue explorar y analizar el impacto que las adecuaciones curriculares de la Nueva Escuela Mexicana tienen en la salud mental del personal docente de Educación Media Superior, los objetivos específicos fueron, identificar los principales factores de estrés relacionados con la implementación de las adecuaciones curriculares, explorar las percepciones, emociones y actitudes del personal docente ante los cambios curriculares, documentar estrategias personales e

institucionales utilizadas para afrontar el impacto emocional y finalmente, proponer recomendaciones para apoyar la salud mental del personal docente durante procesos de cambio educativo.

Materiales y métodos

Este estudio empleó un enfoque cuantitativo, de tipo descriptivo y transversal (Hernández-Sampieri *et al.*, 2014), con el objetivo de analizar la percepción docente sobre la implementación del nuevo modelo educativo bajo el enfoque de la Nueva Escuela Mexicana (NEM) en planteles de la DGETAyCM a nivel nacional. La población objetivo estuvo conformada por docentes en activo en los subsistemas CBTA 110 "Profr. Luis Córdova Reyes.^{en} Tecamatlán, Puebla, estimando un universo aproximado de 26 docentes.

Se utilizó un muestreo probabilístico estratificado por entidad federativa y tipo de plantel, obteniéndose un tamaño mínimo de muestra de 372 docentes con base en la fórmula para poblaciones finitas (95% de confianza, 5% de error). El instrumento de recolección consistió en un cuestionario estructurado tipo Likert, validado mediante juicio de expertos y prueba piloto, el cual abordó tres dimensiones: carga emocional, apoyo institucional y percepción pedagógica (Figura 1).

La recolección de datos se realizó en línea mediante formularios digitales (el cuestionario se distribuyó **en línea** por Google Forms o Microsoft Forms), con apoyo logístico de coordinadores regionales. El análisis estadístico incluyó estadística descriptiva (medias, frecuencias, desviaciones estándar), así como pruebas inferenciales como t de Student, ANOVA y chi-cuadrada, para explorar diferencias significativas entre

grupos. Se garantizó la confidencialidad, principios éticos de la investigación anonimato y consentimiento informado social. de todos los participantes, siguiendo



Figura 1: Diagrama de la metodología. Elaboración propia.

Resultados y discusión

La muestra analizada estuvo conformada por 25 docentes de educación media superior, adscritos en su mayoría al Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 110 (CBTA 110) del estado de Puebla, con un caso proveniente del CBTA 134, en Tlaxcala. La composición del grupo incluyó tanto hombres como mujeres, con rangos de edad y años de experiencia profesional diversos.

El análisis se centró en tres dimensiones fundamentales: carga laboral y emocional asociada a la implementación del nuevo modelo educativo (Nueva Escuela Mexicana), percepción del apoyo institucional recibido durante el proceso de transición, y actitudes personales frente al cambio curricular. Asimismo,

se incluyeron observaciones cualitativas que complementan la interpretación de los datos.

En cuanto a la dimensión emocional y de carga laboral, 19 de los 25 participantes (76%) reportaron sentirse sobrecargados y/o emocionalmente agotados, lo cual evidencia un nivel significativo de tensión derivado de las nuevas exigencias administrativas y pedagógicas. Pese a este contexto, se destaca que el 72% de los encuestados (18 docentes) manifestó mantener una actitud positiva hacia la transición, lo que sugiere la presencia de mecanismos personales de afrontamiento o compromiso profesional (Figura 2).

Figura 1. Análisis general de percepciones docentes frente a la NEM

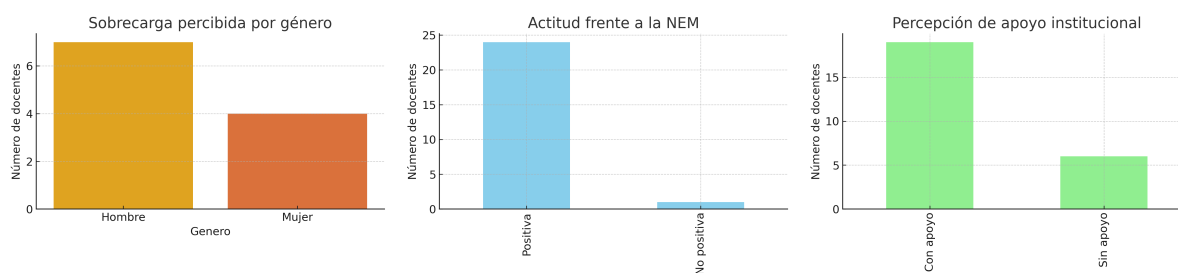


Figura 2: Análisis general de percepciones docentes frente a la NEM.

Respecto al apoyo institucional, 17 docentes (68%) afirmaron contar con respaldo por parte de sus superiores o haber tenido acceso a espacios de acompañamiento emocional o capacitación, mientras que una proporción menor, 12 docentes (48%), señaló sentirse adecuadamente orientada o preparada para aplicar las adecuaciones curriculares en su práctica cotidiana.

El análisis cualitativo de las respuestas abiertas permitió identificar una gama de emociones asociadas al proceso de cambio. Las más recurrentes fueron estrés, ansiedad, inseguridad e incertidumbre, lo cual coincide con

los hallazgos cuantitativos sobre la sobrecarga emocional. No obstante, también se identificaron expresiones con tono propositivo, tales como “innovación y mejora”, “interesante” o “receptivo y con disposición”, que evidencian la apertura de algunos docentes a resignificar la transición como una oportunidad de desarrollo profesional.

Este panorama revela una comunidad docente tensionada, pero no exenta de resiliencia, que enfrenta el desafío del nuevo modelo con una mezcla de agotamiento e iniciativa transformadora (Figura 3).

Figura 2. Análisis por años de antigüedad docente

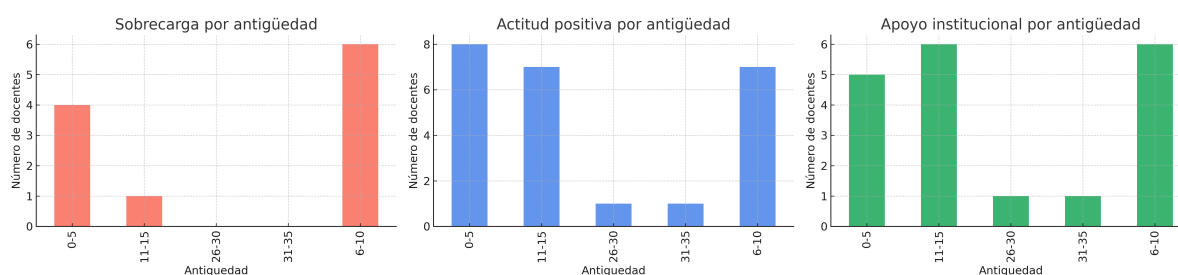


Figura 3: Análisis por años de antigüedad docente.

Los resultados obtenidos en este estudio confirman una tendencia ya documentada en investigaciones previas respecto al impacto emocional y profesional que generan los procesos de reforma educativa en el personal docente. La mayoría de los participantes manifestaron altos

niveles de **sobrecarga emocional y administrativa**, una percepción también reportada por Rodríguez y Pérez (2022), quienes concluyeron que el principal efecto inmediato de las políticas educativas recientes ha sido el aumento del estrés laboral, especialmente en planteles de educación

media superior con recursos limitados.

En este trabajo, se evidenció un **desfase entre las exigencias del nuevo modelo educativo y el acompañamiento institucional**, un fenómeno que coincide con lo descrito por Ramírez-Macías y López (2021), quienes subrayan que la implementación de la Nueva Escuela Mexicana (NEM) ha carecido de una estrategia sólida de capacitación contextualizada y continua. A pesar de que algunos docentes reportan recibir apoyo de sus directivos, este parece estar limitado a aspectos logísticos o administrativos, sin incidir directamente en el fortalecimiento de la práctica pedagógica frente a las nuevas directrices curriculares.

Asimismo, la presente investigación revela una **resistencia silenciosa pero reflexiva** por parte de algunos docentes, quienes cuestionan la pertinencia del modelo respecto a las necesidades reales del país. Esta postura crítica ha sido documentada también por Flores (2020), quien sostiene que muchos docentes experimentan un conflicto entre su experiencia profesional acumulada y la constante modificación de políticas sin consulta participativa. De hecho, la percepción de que las decisiones curriculares provienen de entornos alejados del aula es una constante que afecta el sentido de pertenencia y vocación, como también lo afirma Cano (2023) en su estudio sobre narrativa docente y reformas educativas.

No obstante, cabe destacar que una **proporción significativa de docentes en este estudio mantiene una actitud positiva frente al cambio**, identificando la transición como una oportunidad para mejorar sus prácticas. Esta dualidad entre el agotamiento institucional y la resiliencia

profesional también fue observada por Aguilar y Vargas (2021), quienes proponen que la respuesta docente a los cambios depende en gran medida del acompañamiento pedagógico recibido y de la posibilidad de generar redes colaborativas.

Por lo tanto, estos hallazgos reafirman la necesidad urgente de diseñar procesos de transformación educativa que **no solo estén sustentados en la innovación curricular, sino también en el cuidado de la salud mental docente, la capacitación situada y el respeto a la experiencia profesional**, elementos que inciden directamente en el éxito o fracaso de cualquier reforma.

Conclusión

Los hallazgos del presente estudio permiten identificar una serie de patrones relevantes en la percepción docente ante la implementación de la Nueva Escuela Mexicana (NEM) en el nivel medio superior. En primer lugar, se constató un **consenso generalizado respecto a la sobrecarga laboral**, atribuida principalmente al aumento de las exigencias administrativas y pedagógicas vinculadas al nuevo modelo. Esta situación ha generado un desgaste emocional significativo entre los docentes, afectando su bienestar integral y su desempeño profesional.

En segundo lugar, si bien **el apoyo institucional es percibido como un elemento positivo**, este resulta insuficiente para responder a las necesidades reales de capacitación y acompañamiento durante el proceso de transición. La brecha entre las expectativas del modelo y las condiciones materiales e institucionales ha contribuido a una sensación de desamparo en parte del profesorado.

En tercer lugar, se evidenció que **una mayoría de los docentes mantiene un compromiso profesional elevado**, a pesar del contexto adverso. No obstante, esta disposición coexiste con manifestaciones de agotamiento emocional y estrés, lo que podría comprometer la sostenibilidad del cambio si no se atienden dichas afectaciones con prontitud.

Asimismo, se observó una **actitud ambivalente frente a la NEM**. Mientras algunos educadores reconocen oportunidades de mejora en su práctica pedagógica, otros expresan sentimientos de ansiedad, incertidumbre y frustración ante la falta de claridad en los lineamientos y la continuidad de los procesos de reforma educativa.

Finalmente, se concluye que **la implementación exitosa de un modelo educativo transformador exige una estrategia de acompañamiento integral**, que considere no solo la capacitación técnica y curricular, sino también el fortalecimiento del bienestar emocional del profesorado, mediante recursos adecuados, espacios de escucha activa y estructuras organizacionales sensibles al contexto escolar.

Referencias

- [1] Aguilar, M., & Vargas, D. (2021). *Resiliencia docente y adaptación curricular en contextos de cambio*. Revista Latinoamericana de Educación, 23(2), 55–72.
- [2] Álvarez-García, D., Rodríguez, C., & González-Castro, P. (2020). Bienestar psicológico y factores asociados en docentes de secundaria. Revista de Educación, 388, 145–172. <https://doi.org/10.4438/1988-592X-RE-2020-388-456>
- [3] Cano, L. (2023). *Narrativas docentes y percepción del cambio en educación media superior: una mirada crítica al modelo NEM*. Estudios Educativos, 39(1), 31–49.
- [4] Barragán, G., Solís, M., & Contreras, L. (2023). Cambios educativos y su impacto emocional en docentes de bachillerato en México. Revista Mexicana de Investigación Educativa, 28(97), 189–213.
- [5] Demerouti, E., Bakker, A. B., Nachreiner, F., & Schaufeli, W. B. (2001). The job demands-resources model of burnout. Journal of Applied Psychology, 86(3), 499–512. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.86.3.499>
- [6] Flores, G. (2020). *Imposición y resistencia: el papel de los docentes ante las reformas educativas en México*. Revista Iberoamericana de Política y Educación, 15(3), 114–130.
- [7] Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación (INEE). (2019). Condiciones laborales y salud del profesorado en México. INEE.
- [8] Karasek, R. A. (1979). Job demands, job decision latitude, and mental strain: Implications for job redesign. Administrative Science Quarterly, 24(2), 285–308. <https://doi.org/10.2307/2392498>
- [9] Ramírez-Macías, A., & López, C. (2021). *Implementación de la Nueva Escuela Mexicana en bachillerato: desafíos institucionales y percepción docente*. Perfiles Educativos, 43(171), 102–123.
- [10] Rodríguez, J., & Pérez, S. (2022). *Reformas educativas y carga*

- emocional en docentes de nivel medio superior*. Revista Mexicana de Investigación Educativa, 27(94), 78–101.
- [11] López-Cabarcos, M. Á., Piñero-Chousa, J., & Vázquez-Suárez, M. J. (2021). La salud mental en el sector educativo: causas, consecuencias y estrategias de intervención. *Revista de Psicología del Trabajo y de las Organizaciones*, 37(2), 93–101. <https://doi.org/10.5093/jwop2021a12>
- [12] Maslach, C., & Leiter, M. P. (2016). *Burnout: El precio del éxito*. Paidós.
- [13] Organización Mundial de la Salud (OMS). (2022). Salud mental en el lugar de trabajo. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mental-health-at-work>
- [14] Sánchez-Hernández, J. L., & Arcos-Vega, C. (2022). Transiciones curriculares y desgaste docente: análisis desde el modelo de recursos laborales. *Educación y Futuro*, 46, 81–102.
- [15] UNESCO. (2021). Marco de referencia para el bienestar docente. <https://unesdoc.unesco.org/>



