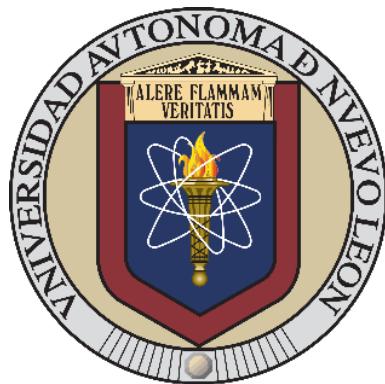


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



EVALUACIÓN DE METALES PESADOS (As, Cd, Cr, Hg y Pb) EN EL MATERIAL
PARTICULADO DEPOSITADO EN HOJAS DE *Quercus* spp. (MAGNOLIOPSIDA:
FAGALES) EN EL CAMPUS DE CIUDAD UNIVERSITARIA DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.

Por

BIÓL. MELISA DENISE ARCE MARTÍNEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CONSERVACIÓN, FAUNA SILVESTRE Y SUSTENTABILIDAD

2025

EVALUACIÓN DE METALES PESADOS (As, Cd, Cr, Hg y Pb) EN EL MATERIAL
PARTICULADO DEPOSITADO EN HOJAS DE *Quercus* spp. (MAGNOLIOPSIDA:
FAGALES) EN EL CAMPUS DE CIUDAD UNIVERSITARIA DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.

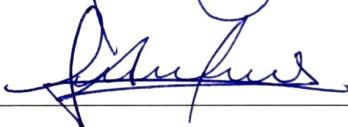
Comité de Tesis



Dr. José Ignacio González Rojas
Director de Tesis



Dr. Antonio Guzmán Velasco
Secretario



Dra. Alina Olalla Kerstupp
Vocal



Dr. Gabriel Ruiz Aymá
Vocal



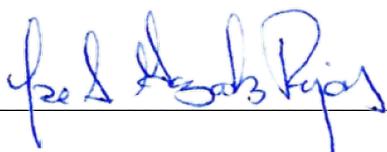
Dr. Juan Pablo Ceyca Centreras
Vocal



Dra. Katiushka Arevalo Niño
Subdirectora de Posgrado

EVALUACIÓN DE METALES PESADOS (As, Cd, Cr, Hg y Pb) EN EL MATERIAL
PARTICULADO DEPOSITADO EN HOJAS DE *Quercus* spp. (MAGNOLIOPSIDA:
FAGALES) EN EL CAMPUS DE CIUDAD UNIVERSITARIA DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.

Dirección de Tesis



Dr. José Ignacio González Rojas
Director de Tesis



Dr. Marco Loredo Tovías
Director externo

DERECHOS RESERVADOS©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta Tesis está protegido, el uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material contenido que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde se obtuvo mencionando al autor o autores

AGRADECIMIENTOS

Dr. José Ignacio González Rojas por su dirección y apoyo.

Dr. Marco Loredo Tovías por su constante guía y enseñanzas.

Dr. Antonio Guzmán Velasco por su gran apoyo.

Dr. Gabriel Ruiz Aymá, Juan Pablo Ceyca Contreras, Dra. Alina Olalla Kerstupp y Dra. Susana Favela Lara por el apoyo y asesoría.

Le agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación apoyarme económicamente para la realización de mis estudios de Maestría y al Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por el apoyo en el análisis de muestras.

DEDICATORIA

A mi madre que siempre me apoyo y a quien le debo todo en mi vida. Por ti es que nunca lo deje de intentar.

A mi hermana que es el respaldo de mi alma.

A mi hermano que creyó en mí.

A mi sobrina porque deseo que crezcas en un mundo mejor

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	viii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES.....	3
Contaminación atmosférica.....	3
Industrias que contaminan el aire.....	6
Evidencias históricas de la contaminación.....	7
Daños a la salud por contaminación atmosférica.....	9
Panorama de la contaminación atmosférica.....	11
Deposición de partículas sobre las hojas.....	12
JUSTIFICACIÓN.....	14
HIPÓTESIS.....	15
OBJETIVO DEL TRABAJO.....	16
MATERIAL Y MÉTODOS.....	17
Área de estudio.....	17
Selección de sitios de colecta.....	18
Muestreo.....	21
Tratamiento de muestras.....	21
Separación de partículas sólidas.....	21

Digestión asistida por microondas.....	22
Análisis de elementos traza por ICP-MS.....	22
Superficie foliar.....	23
Análisis estadístico.....	23
RESULTADOS.....	25
Evaluación cuantitativa de las partículas.....	25
Valores globales de metales pesados.....	30
DISCUSIÓN.....	40
Polígonos.....	40
Estaciones.....	42
Normativa Mexicana.....	43
CONCLUSIÓN.....	45
PRESPECTIVAS.....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Promedio de hojas obtenidas y el promedio de la superficie foliar.....	25
Tabla 2 Concentraciones (ppm) de los metales pesados depositados en primavera.....	26
Tabla 3 Concentraciones (ppm) de los metales pesados captados en verano.....	27
Tabla 4 Concentraciones (ppm) de los metales pesados captados en otoño.....	28
Tabla 5 Concentraciones (ppm) de los metales pesados captados en invierno.....	29
Tabla 6 Resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk y Fligner-Killeen.....	37
Tabla 7 Resultados de las pruebas Permanova y Simper de los polígonos.....	38
Tabla 8 Resultados de las pruebas Permanova y Simper de las estaciones.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Polígonos de muestreo dentro del campus de Ciudad Universitaria.....	17
Figura 2 Polígono 1.....	18
Figura 3 Polígono 2.....	19
Figura 4 Polígono 3.....	19
Figura 5 Polígono 4.....	20
Figura 6 Polígono 5.....	20
Figura 7 Análisis de muestras con Espectrofotómetro de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS)	22
Figura 8 Análisis de superficie foliar de las hojas de encinos colectadas mediante el programa ImageJ y un vernier de referencia	23
Figura 9 Metodología de campo y laboratorio	24
Figura 10 Concentraciones (ppm) anuales acumuladas de metales pesados en Cd. Universitaria, UANL.....	30
Figura 11 Concentraciones (ppm) anuales acumuladas de metales pesados en los polígonos.....	31
Figura 12 Concentraciones (ppm) anuales acumuladas de metales pesados en las estaciones.....	31
Figura 13 Las concentraciones de arsénico (ppm) por polígonos	32
Figura 14 Las concentraciones de cadmio (ppm) por polígono.....	32
Figura 15 Las concentraciones de cromo (ppm) por polígono.....	33
Figura 16 Las concentraciones de mercurio (ppm) por polígono	33
Figura 17 Las concentraciones de plomo (ppm) por polígono.....	34
Figura 18. Las concentraciones de arsénico (ppm) por estación.....	34
Figura 19 Las concentraciones de cadmio por estación (ppm).....	35

Figura 20 Las concentraciones de cromo estación (ppm).....	35
Figura 21 Las concentraciones de mercurio por estación (ppm).....	36
Figura 22 Las concentraciones de plomo por estación (ppm).....	36

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

As	Arsénico
Cd	Cadmio
C	Centígrado
cm	Centímetro
Cr	Cromo
EPOC	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica
ICP-MS	Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente
gr	Gramo
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio
L	Litro
Mn	Manganeso
MTBE	Metil-ter-butil-eter
Hg	Mercurio
m	Metro
µm	Micrómetro
mm	Milímetro
mL	Mililitro
OMS	Organización Mundial de la Salud
ppm	Partes por millón
PM	Partículas suspendidas
Pg	Picogramo
Pb	Plomo
rpm	Revoluciones por minuto
SO ₂	Dióxido de azufre
t	Tonelada

UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León
UTM	Universal Transverse Mercator
ZMM	Zona Metropolitana de Monterrey

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo cuantificar la concentración de metales pesados (As, Cd, Cr, Hg y Pb) en el polvo atmosférico depositado sobre las hojas de *Quercus* spp. en el campus de Ciudad Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), ubicado en la zona metropolitana de Monterrey. La importancia de esta investigación radica en la creciente contaminación del aire y los efectos adversos que implica para el medio ambiente, así como también para la salud humana. Se emplearon encinos como biomonitores debido a su reconocida capacidad para captar material particulado atmosférico (Memoli et al. 2020). Para ello, se delimitaron zonas con distintas fuentes de contaminación y se realizaron muestreos durante las cuatro estaciones del año 2022. Las muestras recolectadas fueron analizadas mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), y los datos obtenidos se procesaron en el entorno estadístico R-Studio. Los resultados evidenciaron diferencias significativas en las concentraciones de metales entre los polígonos del campus universitario, así como entre las distintas estaciones del año.

ABSTRACT

This study aims to quantify the concentration of heavy metals (As, Cd, Cr, Hg, and Pb) in atmospheric dust deposited on the leaves of *Quercus* spp. on the Ciudad Universitaria campus of the Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), located in the metropolitan area of Monterrey. The relevance of this research lies in the growing concern over air pollution and its adverse effects on both human health and the environment. Oak trees were used as biomonitoring due to their recognized ability to capture airborne particulate matter (Memoli et al. 2020). Areas with different pollution sources were delineated, and sampling was conducted during the four seasons of 2022. The collected samples were analyzed using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), and the data were processed in R-Studio. The results revealed significant differences in metal concentrations among the sampling zones within the university campus, as well as across the different seasons of the year.

INTRODUCCIÓN

El arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg) y plomo (Pb) son metales pesados que pueden ser perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente, estos son parte de la mezcla que conforma la contaminación atmosférica en forma de polvo, este polvo está compuesto por pequeñas partículas como las PM10 (10 µm). El polvo puede ser inhalado debido a su tamaño y logra atravesar los mecanismos naturales protectores como el vello nasal por lo que fácilmente logra ingresar en las vías respiratorias y sistema circulatorio provocando enfermedades. El polvo no solo contamina el sitio donde fue emitido, sino que mediante el viento logra trasladarse largas distancias contaminando otros sitios. El material particulado se encuentra suspendido en la atmósfera por horas o días y posteriormente comienza a descender hasta depositarse sobre la vegetación (Memoli et al. 2020). La vegetación tiene la capacidad de retener la contaminación ya sea absorbiendo los gases mediante los estomas o también puede adsorber el polvo que es depositado sobre ella, algunas plantas presentan estructuras y características que favorecen su retención como la rugosidad de sus hojas o las vellosidades (Dalmasso et al. 1997). Los encinos se han utilizado ampliamente con el propósito de hacer monitoreos del material particulado así como de metales traza (Esposito et al. 2020).

El Campus Universitario de la Universidad Autónoma de Nuevo León se encuentra en la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), donde se localizan diversas fuentes de contaminación del aire principalmente de origen industrial y derivadas del uso de combustibles fósiles. La exposición continua a la contaminación atmosférica representa un riesgo para la población, aumentando la probabilidad de desarrollar padecimientos cardiovasculares, enfermedades respiratorias e incluso provocar una defunción anticipada.

Ante la escasez de trabajos sobre la acumulación de metales pesados en el material particulado retenido por los encinos, este proyecto busca llenar ese vacío de conocimiento. Para ello, se realizaron cuatro muestreos estacionales de hojas en cinco polígonos dentro del campus universitario, seleccionados en función de su proximidad a distintas fuentes emisoras de contaminantes, como avenidas con alto tráfico vehicular, estaciones y líneas

de metro, industria metalúrgica, un estadio deportivo con uso frecuente de pirotecnia y áreas de estacionamiento. El objetivo fue analizar la variación en la concentración de metales pesados a lo largo del año y por estación.

ANTECEDENTES

Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica es un problema actual e internacional de alta importancia, la Organización Mundial de la Salud (OMS) provoca muertes tempranas en todo el mundo y se estima que son por año 7 millones, aunado a esto gran parte de la población también padecen enfermedades crónicas que saturan los centros de salud y consecuentemente afecta la economía (OMS 2024).

Entre los contaminantes del aire se encuentran, óxidos de nitrógeno (N_2O), compuestos orgánicos volátiles, ozono (O_3), óxidos de azufre (SO_2) y monóxido de carbono (CO), los cuales generan preocupación debido a que ocasionan mortalidad y morbilidad, esto particularmente en las zonas urbanas y a las partículas que se caracterizan por tener diámetros inferiores de 10 μm son a las que se les atribuye estos padecimientos, las cuales son conocidas como fracción inhalable (World Health Organization 2021).

Son microscópicas las partículas que se encuentran suspendidas en el aire, están conformadas por una mezcla compleja de diferentes elementos orgánicos e inorgánicos y compuestos tanto sólidos, líquidos y gaseosos, tienen una gran diversidad de tamaños, son liberados al medio ambiente, provienen de fuentes antropogénicas, como la actividad industrial, actividades agrícolas, quema de combustibles fósiles que emiten entre algunos contaminantes como el CO_2 y los hidrocarburos aromáticos policíclicos emitidos por la combustión incompleta de hidrocarburos (Mastandrea et al. 2005) y también se origina a partir de fuentes naturales algunos de ellos pueden ser la ceniza (volcánica o proveniente de fuegos forestales), dióxido de carbono (expulsado por la erupción de un volcán) y el polvo (Yglesias y Chamizo 2013).

Después de la liberación de los contaminantes primarios, que son aquellos que no sufren una modificación desde su emisión, estos se mantienen suspendidos en la atmósfera y quedan expuestos a las condiciones meteorológicas existentes como la radiación ultravioleta, viento, lluvia o cambios de temperatura lo que conduce a una serie de

reacciones intermedias entre los mismos originando los contaminantes secundarios, de esta misma forma ocurre la formación del ozono que es producto de la reacción fotoquímica entre hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x), oxígeno molecular (O_2) ante la exposición de altas temperaturas y radiación ultravioleta (Calderón et al. 2000; Ballester 2005).

Dentro de la mezcla heterogénea de contaminantes atmosféricos podemos hallar las partículas suspendidas con una variedad de componentes químicos, así como de características físicas que son potencialmente peligrosas para la salud humana. La capacidad para que lleguen las partículas suspendidas a representar un riesgo para la salud depende directamente de algunos factores, como la composición química, tamaño y la concentración de las partículas suspendidas (World Health Organization 2021). El material particulado en suspensión tiene la capacidad de ingresar a las vías respiratorias causando oxidación e inflamación, debido a su tamaño las partículas finas y ultrafinas llegan a penetrar más profundamente en el tracto respiratorio que partículas de mayor tamaño, provocando efectos adversos para la salud más intensos. Estas partículas pueden contener elementos tóxicos (Valavanidis et al. 2008).

Las partículas suspendidas a diferencia de otros contaminantes del aire tienen la peculiaridad de ser de tamaños bastante pequeñas, en el tracto respiratorio la mayoría son filtradas por moco y cilios, pero las partículas menores a $10 \mu\text{m}$ no logra ser filtrado de esta forma logran ingresar a los alvéolos o bronquiolos (Schulze et al. 2017).

El tamaño aproximado que puede tener el material particulado va de 0.007 hasta $60 \mu\text{m}$. Las partículas finas pueden contener aerosoles, los cuales son formados de manera secundaria (conversión de gas a partícula) a partir de compuestos orgánicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos o bien por compuestos inorgánicos entre los cuales se encuentran los metales pesados recondensados. fósiles que emiten entre algunos contaminantes como el CO_2 y la fracción más pequeña que comprende las partículas finas posee mayor acidez (iones hidrógeno) como los ácidos sulfúrico o nítrico, entre otros. Las partículas de gran tamaño, llamadas gruesas, con frecuencia están constituidas por polvo que proviene de carreteras e industrias, pero también por materiales del suelo. Las partículas presentan variaciones entre ellas como es su procedencia u origen, composición

y tamaño. Las partículas se pueden clasificar mediante el diámetro aerodinámico que determina sus propiedades aerodinámicas. Las partículas clasificadas como fracción gruesa son aquellas con tallas de 5 μm a 10 μm , se les denomina PM10 y pueden quedar suspendidas en el aire por horas o días y después descender. Las partículas clasificadas como fracción fina con tallas de 2.5 μm a 5 μm se les denomina PM5 y PM2.5, estas se quedan suspendidas en el aire de días a semanas. Las que son clasificadas como fracción ultrafina tienen tallas menores a 100 nm y se quedan suspendidas por minutos o horas (Bouma et al. 2023; García et al. 2019).

La contaminación atmosférica por metales unidos a partículas suspendidas (PM) representa una importante preocupación de salud pública a nivel global debido a su naturaleza altamente tóxica sobre los seres vivos con alta persistencia y tendencia a la bioacumulación (Shahid et al. 2021).

Las vías de ingreso de los metales pesados al cuerpo humano son principalmente por beber agua contaminada así como el consumo de alimento contaminado, la inhalación y en menor medida, por contacto dérmico (Deng et al. 2022). La forma iónica libre de un metal es, por lo general, la más biodisponible, y su concentración suele ser el mejor indicador tanto de toxicidad como de bioacumulación (Zhao et al. 2016). Estos iones libres, como el Cu⁺, pueden atravesar la membrana celular. Además, tienen la capacidad de reaccionar de manera similar al metal en su forma elemental (Smith et al. 2015).

Los metales pesados es un término para referirse a aquellos elementos que tanto su peso molecular como su masa es mayor de 20 y su densidad supera los 4 gr/cm³, estos elementos suelen ser tóxicos incluso en bajas dosis, pero algunos también forman parte de los oligoelementos que son necesarios para la salud. Los metales pesados se encuentran, en la atmósfera, básicamente en forma de partículas. Las partículas suspendidas tienen un alto potencial para adsorber metales pesados formando complejos metal-PM de diversas composiciones y tamaños (Zhang et al. 2018).

La contaminación atmosférica con partículas metálicas ha aumentado considerablemente durante las últimas cinco décadas debido al incremento de la urbanización y con ello las actividades económicas y la industrialización. La situación está empeorando

considerablemente en regiones con intensa actividad industrial. Los metales pesados presentes en la atmósfera, si se depositan constantemente en pequeñas cantidades durante largos períodos de tiempo, se acumulan en los compartimentos ambientales constituyendo un riesgo cada vez mayor para el medio ambiente y la salud humana (Shahid et al. 2021).

La transferencia de partículas transportadas por el aire a superficies de la biosfera mediante deposición seca y húmeda establece la primera etapa de acumulación de metales pesados atmosféricos. La ruta predominante depende del tipo de especie química y de factores meteorológicos como la velocidad y dirección del viento, así como de la intensidad y distribución de la lluvia (Hoodaji et al. 2012).

Los metales pesados en el medio ambiente son liberados tanto por procesos naturales como antropogénicos. Las principales fuentes de partículas en suspensión metálicas son la industria metalúrgica y de la fundición, generación de electricidad, la minería y las emisiones vehiculares. Algunos ejemplos de metales pesados son arsénico, cadmio, cromo, manganeso, mercurio y plomo (Londoño et al. 2016).

Industrias que contaminan el aire

En la actualidad, uno de los ejemplos más representativos de contaminación atmosférica es la industria de la construcción, la cual genera emisiones significativas debido a las actividades que producen grandes cantidades de polvo, como la excavación debido a la resuspensión de partículas, el traslado de los materiales (Yang et al. 2023) así como en la fase de obtención de materias primas como la arena y en la fabricación de materiales de construcción como el cemento (Rentier y Cammeraat 2022; Andrew 2018). La construcción y el término de vida útil de los edificios, así como el uso de transporte en el sitio de la obra implica uso de combustibles fósiles (Wieser et al. 2021). Otra fase contaminante de los edificios es su uso ya que disponen de sistemas de climatización, gas para cocina, pintura que producen la liberación de partículas, metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, dióxido de nitrógeno (NO_2), entre otros (Esquivel y Cuba 2006).

La industria petroquímica tiene procesos altamente dañinos para el medio ambiente como las emisiones de hidrocarburos aromáticos y no aromáticos, dióxido de azufre y el sulfuro

de hidrógeno por la destilación del crudo (González et al. 2004). Además de la adición de tetraetilo de plomo a la gasolina debido a que su combustión libera plomo al aire, se ha utilizado metil-ter-butil-eter (MTBE) como sustituto, pero contamina el agua (Galván et al. 2007). Otra industria importante que contamina el aire es la metalúrgica como resultado de fundir concentrados con cobre emiten dióxido de azufre (SO_2) (Medina y Vega 2019), al fundir metales ferrosos o no ferrosos producen compuestos orgánicos halogenados (Xu et al. 2018), la fundición de calcinas produce plomo y arsénico afectando tanto aire como suelo (Cubillas et al. 2011). Así como la liberación de partículas que contienen metales pesados como plomo, cobre, zinc, arsénico y cadmio a causa de las refinerías de cobre y zinc entre otros minerales (Aragón et al. 2006). En la industria eléctrica se puede emplear distintas materias primas como combustible algunos ejemplos son carbón, madera y gas licuado, dependiendo de la materia prima que se use será el compuesto que emite. En las termoeléctricas se usa mayormente el combustóleo lo que produce emisiones de SO_2 y NO_x , pero también se usa el gas natural (Zuk et al. 2006). Por el contrario, existen contaminantes que no son fuentes fijas, las fuentes móviles como los medios de transporte tienen un importante impacto en el medio ambiente relacionado con el aumento de la población, crecimiento de las ciudades y la necesidad de traslado dentro de ellas ya que se modifica el ambiente para construir su infraestructura. Asimismo, el daño provocado se debe a que las ciudades se diseñen para hacer uso del transporte motorizado, el cual también causa daños al ambiente en términos de emisiones de dióxido de carbono, monóxido de carbono (CO), NO_x , compuestos orgánicos metálicos y partículas en suspensión (PM10 y PM 2.5) (Hernández et al. 2022).

Los usos industriales que se le da al arsénico como ingrediente de pesticidas, pintura, anticorrosivos, vidrio, productos para tratar la madera, medicamentos, bronceadores, como gas de uso militar. El cadmio forma parte de los ingredientes de pilas, plásticos, pintura, asbestos, vidrio soldadura, medicamentos. El cromo se ha usado como agente para curtir la piel, metalurgia, galvanización, tratamiento de madera, pintura, industria química. El mercurio se usa en pinturas, pesticidas, baterías, cosméticos, medicamentos, empastes dentales y amalgamas, drogas y pulpa para el papel. El plomo se encuentra en la gasolina, baterías, pantallas, joyería, grifería, aleaciones, armamento, latas, cosméticos, insecticidas, entre otros (Londoño et al. 2016; Rodríguez 2017).

Evidencias históricas de la contaminación

Se ha probado que la contaminación atmosférica afecta la salud desde la antigüedad, en cuerpos humanos momificados egipcios y de distintas procedencias se ha encontrado antracosis pulmonar que es una condición que se caracteriza por la coloración oscura en mucosa bronquial ocasionada por la deposición de partículas de carbón en los pulmones (Mirsadraee 2014). Esto es causado por la contaminación del aire debido a la combustión de aceites o materia vegetal para iluminar, cocinar o calefacción (Capasso 1995). También en la antigüedad existió contaminación por plomo debido a su producción, provocando el aumento de sus concentraciones en la atmósfera, ya que se observó en el siglo VI A.C. concentraciones menores a 5,000t anuales e incremento a 15, 000t anuales durante siglos III y IV A.C. Aproximadamente en el año 0 estas llegaron a superar las 80,000t anuales, posteriormente la industria del plomo descendió y se reestablecieron los niveles de concentración (Capasso 1995).

Se ha encontrado evidencia del incremento de la contaminación atmosférica por metales pesados en el hielo glaciar de Groenlandia. En el caso del plomo, se identificó su presencia a partir del año 1750, con una concentración de 10 pg/g, la más alta registrada en los últimos 2800 años. Posteriormente, a partir de 1930, la contaminación por plomo se incrementó 20 veces debido a la adición de tetraetilo de plomo en la gasolina (Candelone et al. 1995).

La Revolución Industrial (1760-1830) marcó un punto de inflexión en el desarrollo económico, impulsado por la introducción de la máquina de vapor y el auge de la producción intensiva. Este crecimiento generó empleo en las ciudades y un aumento poblacional en los centros urbanos. Sin embargo, también provocó una producción masiva de residuos dañinos con un gran impacto negativo en el medio ambiente, contaminando el agua, la atmósfera y afectando la salud humana y la fauna (Galván y Reyes 2009)

Uno de los eventos históricos más significativos en la contaminación atmosférica fue el Great London Smog, ocurrido el 5 de diciembre de 1952 en la capital británica, donde la temperatura alcanzó los 0°C. Durante este episodio, la quema de carbón de baja calidad con alto contenido de azufre para calefacción generó una gran cantidad de humo

contaminante. Este humo quedó atrapado bajo la capa de inversión térmica, bloqueando la luz solar y disminuyendo aún más la temperatura ambiental. Como consecuencia, se estima que entre 4000 y 12 000 personas fallecieron debido a la contaminación del aire (Polivka 2018).

Daños a la salud por contaminación atmosférica

La contaminación del aire afecta la salud humana desde las primeras etapas del desarrollo, incluso durante la vida intrauterina (Raherison 2020). Se ha encontrado una relación entre la exposición a contaminantes y el nacimiento de bebés con bajo peso y talla menor al promedio (Bergstra et al. 2021).

El sistema respiratorio y cardiovascular son los más vulnerables a la contaminación del aire, aunque la gravedad de los efectos varía según el nivel de exposición y la condición de cada individuo (Ballester 2005). Se ha demostrado que enfermedades como accidentes cerebrovasculares, diferentes tipos de cáncer como el pulmonar, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) además las cardiopatías fatales tienen un origen relacionado con la contaminación del aire. Además, las personas expuestas a un aire contaminado son más propensas a padecer infecciones respiratorias como neumonía, gripe, bronquitis, así como enfermedades crónicas como hipertensión pulmonar y asma (Medina y Vega 2019).

Las partículas suspendidas en el aire provocan muertes prematuras y en particular se ha observado que el incremento de PM10 está relacionado con el aumento de mortalidad cardiorrespiratoria. Mientras que las partículas finas PM2.5, se asocian con enfermedades circulatorias y carcinoma pulmonar (Ballester 2005). Además, estas partículas están relacionadas con infecciones en vías respiratorias, cardiopatía isquémica, ataque cerebral y EPOC (Becerra y Ramos 2020). Se ha demostrado que la exposición prolongada a PM10 y PM2.5 reduce la esperanza de vida (De Keijzer et al. 2017; Becerra y Ramos 2020).

Efectos de los metales pesados en la salud

De acuerdo con Londoño et al. (2016) y Rodríguez (2017), los metales pesados pueden provocar efectos graves en la salud:

- **Arsénico (As):** Causa hiperpigmentación, queratosis, hiperqueratosis, puede provocar cáncer de piel diferentes órganos como pulmón, riñón, vejiga y además afecta el sistema nervioso.
 - **Cadmio (Cd):** Daña los riñones, genera cálculos renales, anemia, hipertensión, cáncer de próstata, trastornos respiratorios y cáncer de pulmón.
 - **Cromo (Cr):** Puede provocar erupciones cutáneas, irritación nasal, daño renal y hepático, enfermedades respiratorias como cáncer de pulmón, úlceras estomacales y afectaciones al sistema inmunológico.
 - **Manganoso (Mn):** Afecta el sistema nervioso, disminuyendo la coordinación motriz, provocando lentitud en la reacción visual, daño ocular y trastornos neurológicos en el sistema extrapiramidal.
 - **Mercurio (Hg):** Puede causar gingivitis, hipertrofia de tiroides, pérdida de memoria, depresión, alucinaciones y taquicardia.
 - **Plomo (Pb):** Afecta el hígado, causa hipertensión y enfermedades cardiovasculares. En niños, puede provocar retraso mental y la intoxicación aguda puede ser fatal.

Además, estudios han encontrado que la exposición a PM10, PM2.5 y partes metálicas como manganoso y plomo disminuyen la tasa de espiración máxima en niños (Hong et al. 2007; Legarreta et al. 2015). La combinación de contaminantes como NO₂ y PM2.5 también se ha asociado con la diabetes mellitus tipo 2 (Balti et al. 2014; Legarreta et al. 2015).

La inhalación prolongada de partículas contaminadas con metales pesados incrementa su acumulación en el organismo, lo que está relacionado con diversas enfermedades (Gray 2003; Timothy y Tagui 2019). La toxicidad y gravedad de los efectos dependen del tipo de compuesto químico, la densidad, el tamaño y la forma de las partículas (García et al. 2019; Angulo et al. 2011). Además, el tiempo de exposición es un factor clave en la afectación de la salud (Medina y Vega 2019).

Grupos vulnerables como adultos mayores, mujeres embarazadas, personas con enfermedades crónicas (diabetes, enfermedades respiratorias y cardiovasculares) y niños son más susceptibles a los efectos de la contaminación. Los niños, en particular, presentan mayor riesgo debido a su alta tasa de respiración en proporción a su peso y al desarrollo incompleto de sus alvéolos y sistema inmunológico. Además, las poblaciones de bajos recursos y aquellas cercanas a zonas industriales o carreteras están expuestas a mayores niveles de contaminación (Ballester 2005; Medina y Vega 2019).

La contaminación atmosférica también tiene un impacto económico significativo, ya que el deterioro de la salud afecta la productividad laboral y genera costos médicos. En México, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) estimó en 2010 que estas pérdidas ascendían a entre 4123.7 y 5690.6 millones de pesos (Becerra y Ramos 2020).

Panorama de la contaminación atmosférica

La Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM) es una de las áreas más contaminadas de México. Su ubicación geográfica, rodeada por los cerros de las Mitrás, Topo Chico, la Silla y la Sierra Madre Oriental, limita la dispersión de contaminantes y contribuye a la acumulación de partículas en el aire (Leal 2019). Las principales fuentes de PM2.5 y PM10 en la ZMM incluyen la industria, el sector habitacional y comercial, el transporte vehicular y la construcción. El crecimiento demográfico ha sido un factor clave en el aumento de la contaminación; en 1980, la población de Nuevo León era de 2.5 millones de habitantes, y para 2020 ascendió a 5.7 millones (SEMARNAT 2016).

Históricamente, la ZMM ha superado los límites de PM10 establecidos por la Secretaría de Salud y el INECC. Entre 1998 y 2007, los niveles de PM10 rebasaron los estándares diarios y anuales permitidos (INECC 2010). En 2020, el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental reportó numerosos días con concentraciones de PM10 por encima del límite permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 (Carrillo 2020).

Deposición de partículas sobre las hojas

Se ha reportado el uso de biomonitores para realizar el estudio de las partículas, como estas son captadas por las hojas de los árboles, resulta ser un método eficaz para colectar pasivamente las partículas (Astorga 2010). Estudios indican que los encinos (*Quercus spp.*) son buenos monitores debido a la morfología de sus hojas tienen una buena capacidad de captación de las partículas, además es común encontrarlo en zonas urbanas (Memoli et al. 2020).

Para llevar a cabo los monitoreos del aire, se puede hacer de manera activa empleando aparatos o de forma pasiva haciendo uso de organismos vivos, como son los árboles, hongos y líquenes (Astorga 2010). Existen varios estudios que implementan árboles de diferentes especies para realizar el monitoreo de la deposición elemental atmosférica o el material particulado retenido como *Pinus sylvestris*, *Acacia retinides*, *Eucalyptus torquata*, entre otras. Utilizar bioindicadores tiene ventajas como tener una alta resolución espacial y temporal además de tener alta disponibilidad de las plantas (Sawidis et al. 2011).

Se ha utilizado *Quercus ilex* en Italia, para el estudio de la contaminación en ambientes urbanos, como los contenidos de material particulado (PM_{2.5}–10 y PM>10), debido a las características con las que cuentan sus hojas ya que tiene la capacidad de captar metales, además nos proporciona información a bajo costo lo cual lo convierte en un buen biomonitor (Memoli et al. 2020).

En el bosque Ezer, Líbano se realizó un estudio sobre el impacto de caminos sin pavimentar usando *Quercus cerris*, se encontró mayor deposición de polvo foliar en sitios experimentales que en el sitio control y se reporta que el polvo disminuye con el aumento de distancia a la carretera (Najib et al. 2022).

En otro estudio se emplearon *Betula pendula*, *Quercus robur* y *Tilia cordata* las cuales son especies con distribución en Europa y fueron expuestas a material particulado de

diferentes fuentes como el cemento, reportaron dos tipos de acumulación de PM, una en la superficie foliar y otra en cera, además la especie que presentó mayor acumulación fue *B. pendula* seguida de *Q. robur* (Łukowski et al. 2020)

En Jinju, Gyeongsangnam emplearon árboles urbanos *Quercus myrsinifolia*, *Quercus glauca*, *Quercus salicina*, *Camellia japonica* y *Prunus x yedoensis* ubicados do, se en un campus universitario, se investigó la relación que existe entre los cambios estacionales y la absorción de polvo fino. La mayor cantidad de polvo absorbido se captó en el mes de enero y existe una correlación entre la cantidad total de cera y la tasa de absorción de la superficie (Jin et al. 2021).

Se ha investigado la capacidad de captar metales pesados (Pb, Cd, Cu y Zn) de hojas de 17 especies vegetales diferentes analizadas en 4 sitios distintos que consistieron en control, residencial, comercial e industrial. Los resultados indicaron que el sitio con más contaminación es el sitio industrial (Patel et al. 2022).

En el Parque Estatal Lázaro Cárdenas, “Flor del Bosque” en Puebla se usaron como biomonitores dos especies de encino: *Quercus mexicana* y *Q. rugosa*, en ese estudio se buscó la presencia de Cr, Cd, Cu, Hg, Ni y Pb, estos fueron encontrados en todas las especies utilizadas (*Juniperus deppeana*, *J. fláccida*, *Eucalyptus camaldulensis*, *E. globulus*, *Mimosa malacophylla* y Euforbiáceas) como biomonitores (Hernández et al. 2016).

Se han realizado diferentes estudios para filtrar la de contaminación del aire a partir de la vegetación urbana como parte de áreas verdes, pero existen otros tipos de estructuras alternativas que pueden ayudar en las estrategias de mitigación como los techos verdes y los muros verticales (Pava 2020).

JUSTIFICACIÓN

La contaminación del aire por metales pesados es un problema grave en la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), una región industrial con alto flujo vehicular y un uso predominante de combustibles fósiles como fuente de energía. En 2021, el 6% de los 365 días presentaron condiciones de contingencia ambiental (SIMA 2024), y en 2019, Monterrey fue señalada como la tercera ciudad más contaminada del país (Mayora 2019). Sin embargo, en la ZMM aún existen pocas investigaciones enfocadas en la acumulación de metales traza en la superficie foliar de la vegetación. Por ello, este estudio busca aportar al conocimiento y comprensión de este fenómeno.

HIPÓTESIS

- Los metales pesados (As, Cd, Cr, Hg y Pb) depositados en las hojas de encino del campus de Ciudad Universitaria de la UANL muestran diferencias significativas entre los diferentes polígonos y las estaciones.

OBJETIVO DEL TRABAJO

- Objetivo General

Evaluar cuantitativamente los metales pesados (As, Cd, Cr, Hg y Pb) depositados en las hojas de *Quercus* spp. en el campus de Ciudad Universitaria de la UANL.

- Objetivos Específicos

1. Evaluar si existen diferencias en la concentración de metales pesados entre los distintos polígonos de estudio.
2. Determinar la variación estacional en la concentración de los metales pesados entre los diferentes polígonos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de Estudio

El Campus Universitario de la Universidad Autónoma de Nuevo León se encuentra en el municipio de San Nicolás de los Garza, Nuevo León, a 520 msnm y sus coordenadas UTM son 2845965 N y 368372 E (Reyes 2010). El área de Ciudad Universitaria es de 944,723.77 m² (UANL 2018). Tiene un clima semiseco y muy cálido, subhúmedo y semicálido con lluvias escasas, los rangos de precipitación son de 500 a 700 mm y el rango de temperatura es 20°C a 24°C (INEGI 2010). Su vegetación está comprendida por 3,608 árboles pertenecientes a 37 familias, 55 géneros y 81 especies de los cuales las especies más frecuentes fueron fresno plumoso (*Fraxinus berlandieriana*) y trueno chino (*Ligustrum lucidum*) (Reyes 2010).



Figura 1. Polígonos de muestreo dentro del campus de Ciudad Universitaria.

Selección de los sitios de colecta

Se establecieron 5 polígonos dentro del campus Universitario (Fig. 1). El criterio para la selección de los polígonos fue que contarán con más de 15 árboles de encinos (*Quercus spp*) maduros, sanos, follaje denso y que estos polígonos colindarán con diferentes fuentes de contaminación (Figuras 2, 3, 4, 5 y 6). Las especies utilizadas como biomonitoras fueron *Q. polymorpha*, *Q. fusiformis* y *Q. vaseyana*. Se utilizaron los encinos debido a la rugosidad de sus hojas, pero además deberían tener una apariencia sana en general, coloración verde oscuro y buen desarrollo, es decir que no presentarán deformaciones, alteraciones como mordidas de insectos, plaga, enfermedades o quemaduras por el sol y que se encontraran a una altura de 1.50 m con respecto al nivel del suelo. En la colecta se escogieron hojas en las que se apreció polvo en su superficie.



Figura 2. Polígono 1: es un área verde que colinda al este con la Avenida Universidad, la estación del metro Universidad y una nave industrial de una empresa metalúrgica, en el oeste y al sur con calles y estacionamientos internos de Ciudad Universitaria. Al norte colinda con la Avenida Fidel Velázquez. Superficie: 47329.410 m². Cantidad de árboles: 159.



Figura 3. Polígono 2: es un estacionamiento ubicado a un costado del estadio universitario y cercano a la Avenida Manuel L. Barragán. Colinda al Sur con el campo militar y al norte con la calle Pedro de Alba y distintas Facultades. Superficie: 23198.728 m². Cantidad de árboles: 61.



Figura 4. Polígono 3: se compone por zonas verdes, calles, canchas deportivas y estacionamientos. Colinda al norte con la Avenida Fidel Velázquez. Superficie: 45015.604 m². Cantidad de árboles: 26.



Figura 5. Polígono 4: es un estacionamiento, rodeado de edificios y áreas verdes, al sur se localiza la calle Pedro de Alba. Superficie: 19684.643 m². Cantidad de árboles: 53.

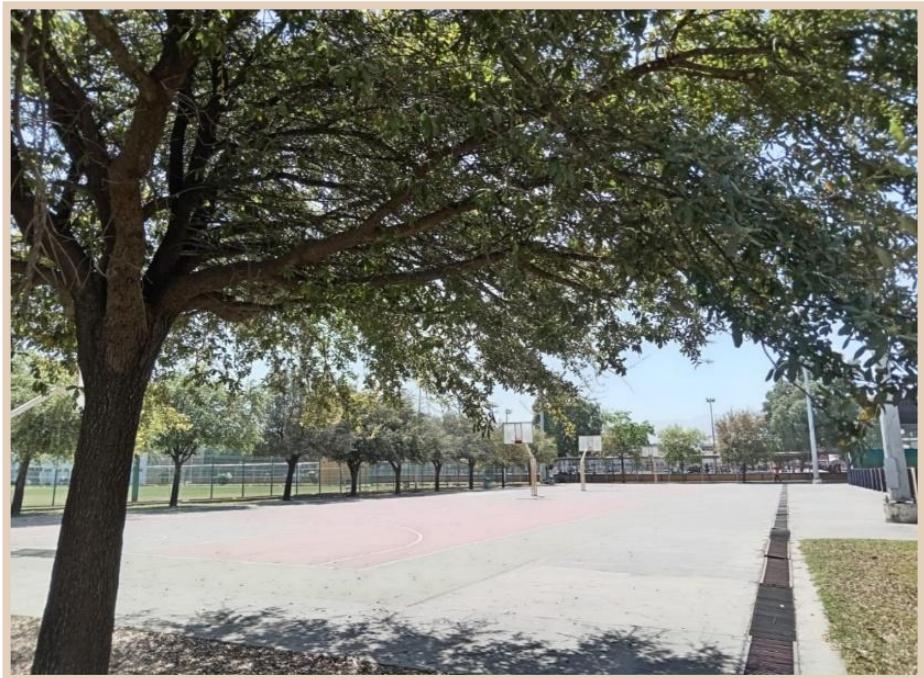


Figura 6. Polígono 5: conformada por canchas deportivas y áreas verdes. Al norte colinda con la Avenida Fidel Velázquez, al oeste se encuentra la Avenida Manuel L. Barragán, una zona habitacional y vías férreas. Al sur hay un estacionamiento. Superficie: 7999.014m². Cantidad de árboles: 26.

Muestreo

Se realizo una colecta de hojas de encino por temporada: primavera (marzo-abril), verano (julio-agosto) y otoño (diciembre) del año 2022 y en invierno (marzo) del año 2023. El muestreo se llevó a cabo en días sin lluvia, en los casos en que se presentó, se esperó un periodo de diez días para asegurar que las hojas presentaran una apariencia sucia. Esta condición motivó la ampliación del periodo considerado para cada temporada. En cada polígono se seleccionaron del total del arbolado, 15 árboles al azar, de los cuales se consideró de 2 a 3 árboles por muestra. Cuando los árboles presentaban alguna enfermedad o se encontraban en malas condiciones, se procedía a su reemplazo. Se tomaron 5 muestras por polígono. Los individuos seleccionados fueron marcados y se registró su georreferencia con GPS GARMIN eTrex 10. De cada encino se colectaron 70 gr de hojas, que se colocaron en bolsas de papel Kraft y se trasladaron al laboratorio de Biología de la Conservación y Desarrollo Sustentable, donde se almacenaron en refrigeración.

Tratamiento de muestras

Separación de partículas sólidas

Para cada muestra, se pesaron 70 gramos de material foliar utilizando una balanza analítica (Radwag, modelo AS 82/220.X2). Posteriormente, las muestras fueron sometidas a un proceso de sonicación en un baño ultrasónico (Fisher Scientific, modelo FS30H) durante 15 minutos a temperatura ambiente, tras lo cual se retiraron las hojas. El líquido resultante fue centrifugado (Thermo Scientific, modelo ST40) en cinco ciclos de 15 minutos a 3000 rpm. Finalmente, los residuos obtenidos se secaron en un horno de convección (Terlab, modelo TE-H70DM) a 65 °C durante 48 horas, hasta obtener el polvo seco correspondiente.

Digestión asistida por microondas

Con el objetivo de conocer las concentraciones de los metales (As, Cd, Cr, Hg y Pb) en el polvo, las muestras se transportaron al Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, donde se continuó con el procesamiento y análisis. Se colocaron 0.2 gr de muestra en viales de teflón y se pesó en balanza analítica (Ohaus modelo Adventure), se añadió 5 mL de HNO₃ ultra-puro, se sometió a digestión en microondas (CEM modelo ONE TOUCH Mars 6) usando el método EPA 3051a, que consistió en una rampa de 15 min para alcanzar 175°C, esa temperatura se mantuvo 5 min. Las muestras se trasvasaron a tubos con 50 mL de agua desionizada y se filtró con membrana de 0.45 µm.

Análisis de elementos traza por ICP-MS

Las muestras se analizaron en un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) (Thermo Scientific modelo X Series 2) (Fig. 7). Se usaron estándares de calibración high purity standard para preparar una curva de calibración multielemental de 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0, 20.0, 50.0, 80.0 y 100 gr/L de As, Cd, Cr, Hg y Pb.



Figura 7. Análisis de muestras con Espectrofotómetro de masas con plasma inductivamente acoplado (ICP-MS).

Superficie foliar

Posterior al procesamiento de las muestras, las hojas fueron colocadas en charolas para ser fotografiadas. Con el programa ImageJ se obtuvo la superficie foliar por muestra, se usó un vernier como referencia de medida (Fig. 8).



Figura 8. Análisis de superficie foliar de las hojas de encinos colectadas mediante el programa ImageJ y un vernier de referencia.

Análisis estadístico

Los metales se analizaron de forma independiente en las pruebas Shapiro-Wilk (Pedrosa et al. 2014; Roysto 1995) para probar la normalidad de los datos y Fligner-Killeen (Fligner y Killeen 1976) para comprobar la homocedasticidad, se eligió esta prueba sobre otras debido a no requiere el supuesto de normalidad y es más robusta frente a datos atípicos. En los análisis posteriores, los datos correspondientes a la concentración de metales fueron agrupados de acuerdo con el polígono de muestreo y la estación del año. Se emplearon

pruebas de Permanova para evaluar la diferencia entre los polígonos y las estaciones muestreadas (Anderson 2014; Leal et al. 2022). Por último, se usó la prueba SIMPER para determinar que metales contribuyen más a la disimilitud, empleando la distancia de Bray-Curtis. Dichas pruebas se realizaron en el software Rstudio (Fig. 9).

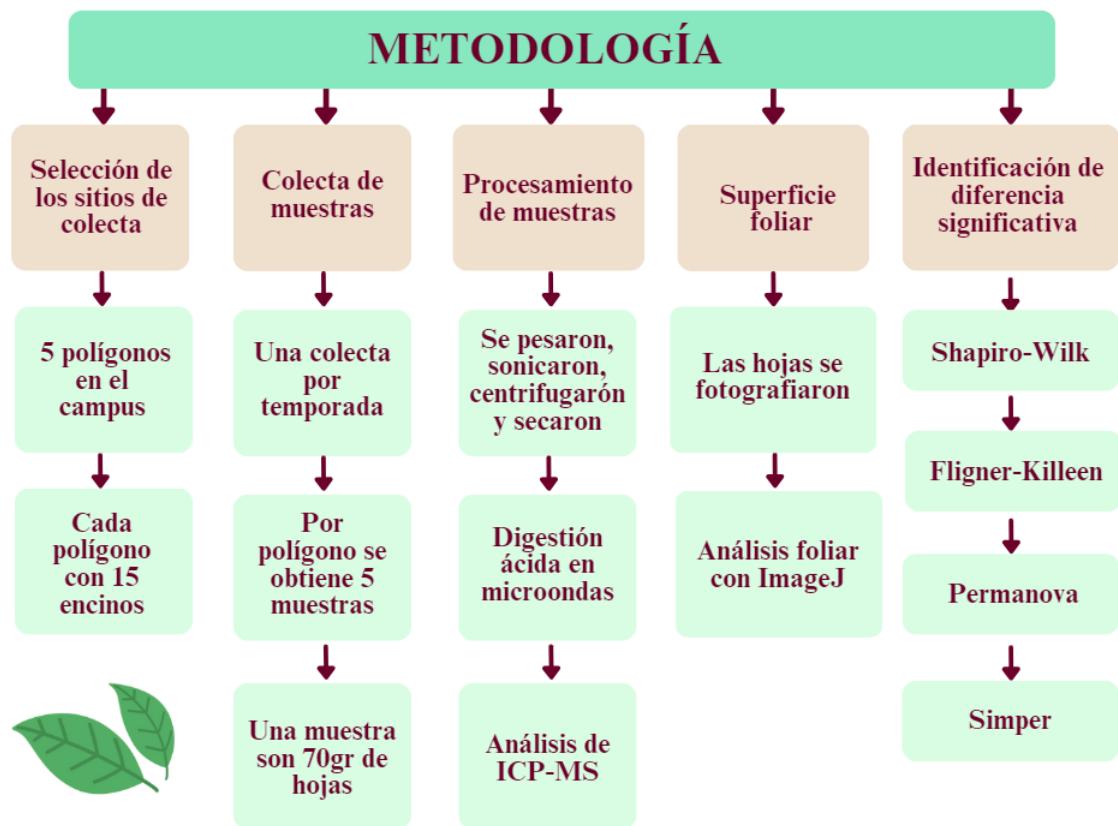


Figura 9. Metodología de campo y laboratorio.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a en los cuales se reportan las concentraciones de metales pesados retenidos. Los datos de las concentraciones de metales pesados se organizan de la siguiente manera: en primer lugar, se presentan las concentraciones globales; posteriormente, se desglosan por polígonos y por estaciones. A continuación, se muestran los resultados de las pruebas estadísticas de Shapiro-Wilk y Fligner-Killeen. Luego se exponen los resultados de los análisis Permanova y Simper por polígonos y después por estaciones.

En cada uno de los cinco polígonos se tomaron cinco muestras por estación, por lo que se obtuvieron 100 muestras. En total se muestrearon 268 encinos de los cuales 70 corresponden a primavera, 68 a verano, 68 en otoño y 62 en invierno (Tabla 1).

Tabla 1. Promedio de hojas obtenidas y el promedio de la superficie foliar.

Promedios	Temporada				Polígonos
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	
Cantidad de hojas en muestras	316	629	437.75	254.50	1
	407.80	677	920.80	409.80	2
	432.80	474.80	516.80	344	3
	415.80	492.40	595.80	504	4
	373	545.40	495.40	323.20	5
Superficie foliar (m ²)	0.31	0.34	0.40	0.23	

Evaluación cuantitativa de los metales pesados

Se detectó la presencia de metales pesados (As, Cd, Cr, Hg y Pb) en los cinco polígonos muestreados, las concentraciones correspondientes se presentan en las tablas 2, 3, 4 y 5.

Tabla 2. Concentraciones (ppm) de los metales pesados depositados en primavera.

Polígono	Muestra	Arsénico	Cadmio	Cromo	Mercurio	Plomo
1	1	3.89	2.28	249.73	0.27	132.13
	2	8.42	2.41	117.46	0.65	217.2
	3	4.53	2.69	176.4	0.12	110.12
	4	5.01	3.39	151.36	0.63	219.43
	5	4.46	3.17	141.48	0.18	124.06
	\bar{x}	5.262	2.788	167.286	0.37	160.588
	<i>Max</i>	8.42	3.39	249.73	0.65	219.43
	<i>Min</i>	3.89	2.28	117.46	0.12	110.12
2	1	3.58	3.92	84.66	0.26	121.88
	2	3.48	3.8	155.55	0.24	135.88
	3	3.87	4.11	153.47	0.23	148.98
	4	2.93	2.96	304.61	0.23	114.05
	5	3.09	3.89	74.6	0.24	154.81
	\bar{x}	3.39	3.736	154.578	0.24	135.12
	<i>Max</i>	3.87	4.11	304.61	0.26	154.81
	<i>Min</i>	2.93	2.96	74.6	0.23	114.05
3	1	4.7	4.23	108.17	0.22	193.54
	2	4.74	3.9	86.26	0.28	186.49
	3	4.86	4.02	112.82	0.27	208.02
	4	4.42	4.09	92.72	0.21	183.98
	5	4.29	4.04	67.82	0.24	154.91
	\bar{x}	4.602	4.056	93.558	0.244	185.388
	<i>Max</i>	4.86	4.23	112.82	0.28	208.02
	<i>Min</i>	4.29	3.9	67.82	0.21	154.91
4	1	10.17	6.46	212.46	0.95	256.04
	2	9.32	6.92	186.93	1.12	249.09
	3	8.55	7.28	188.98	0.77	240.57
	4	10.49	8.14	252.89	1	326.67
	5	11.51	8.76	302.23	1.21	372.6
	\bar{x}	10.008	7.512	228.698	1.01	288.994
	<i>Max</i>	11.51	8.76	302.23	1.21	372.6
	<i>Min</i>	8.55	6.46	186.93	0.77	240.57
5	1	13.48	4.73	166.64	17.13	182.73
	2	7.02	9.2	107.73	1.4	678.08
	3	9.66	10.6	147.82	1.69	512.09
	4	9.7	11.83	129.21	1.86	669.51
	5	9.92	9.77	136.8	1.21	400.25
	\bar{x}	9.956	9.226	137.64	4.658	488.532
	<i>Max</i>	13.48	11.83	166.64	17.13	678.08
	<i>Min</i>	7.02	4.73	107.73	1.21	182.73
\bar{x}		84.2976				

Tabla 3. Concentraciones (ppm) de los metales pesados captados en verano.

Polígono	Muestra	Arsénico	Cadmio	Cromo	Mercurio	Plomo
1	1	3.77	2.9	135.5	1.1	89.32
	2	4.88	2.84	98.07	2.68	160.68
	3	3.59	2.72	138.45	0.74	76.04
	4	3.25	1.99	122.52	0.6	54.17
	5	3.68	2.53	117.63	0.75	71.51
	\bar{x}	3.834	2.596	122.434	1.174	90.344
	<i>Max</i>	4.88	2.9	138.45	2.68	160.68
	<i>Min</i>	3.25	1.99	98.07	0.6	54.17
2	1	3.62	2.31	206.45	1.05	68.4
	2	3.3	1.89	119.19	0.66	59.83
	3	3.31	1.96	128.86	0.61	55.23
	4	3.52	2.47	150.64	0.6	69.19
	5	3.19	2.39	89.48	0.7	68.72
	\bar{x}	3.388	2.204	138.924	0.724	64.274
	<i>Max</i>	3.62	2.47	206.45	1.05	69.19
	<i>Min</i>	3.19	1.89	89.48	0.6	55.23
3	1	3.78	2.71	102.07	1.9	131.1
	2	4.04	3.21	105.2	0.98	145
	3	3.8	3.1	108.29	1.03	130.81
	4	3.23	2.32	131.98	0.68	86.48
	5	3.43	2.8	93.93	1.67	132.12
	\bar{x}	3.656	2.828	108.294	1.252	125.102
	<i>Max</i>	4.04	3.21	131.98	1.9	145
	<i>Min</i>	3.23	2.32	93.93	0.68	86.48
4	1	3.23	2.21	100.08	1.56	86.81
	2	3.63	2.5	113.86	1.62	88.07
	3	5.59	3.3	113	3.15	101.72
	4	3.25	1.78	96.7	1.24	74.02
	5	3.02	1.8	94.51	0.89	72.49
	\bar{x}	3.744	2.318	103.63	1.692	84.622
	<i>Max</i>	5.59	3.3	113.86	3.15	101.72
	<i>Min</i>	3.02	1.78	94.51	0.89	72.49
5	1	3.05	2.3	72.54	0.99	93.6
	2	3.2	2.62	91.01	1.24	111.92
	3	2.75	2.51	81.5	1.31	96.54
	4	2.87	2.55	78.41	1.65	105.3
	5	2.72	2.49	73.75	0.72	92.59
	\bar{x}	2.918	2.494	79.442	1.182	99.99
	<i>Max</i>	3.2	2.62	91.01	1.65	111.92
	<i>Min</i>	2.72	2.3	72.54	0.72	92.59
\bar{x}		42.1224				

Tabla 4. Concentraciones (ppm) de los metales pesados captados en otoño.

Polígono	Muestra	Arsénico	Cadmio	Cromo	Mercurio	Plomo
1	1	1.97	2.38	67.37	0.57	86.5
	2	14.49	3.48	61.84	1.57	209.54
	3	1.94	2.22	60.57	0.65	87.83
	4	2.01	2.65	58.5	1.23	101.71
	5	1.68	2.13	54.88	0.6	83.88
	\bar{x}	4.418	2.572	60.632	0.924	113.892
	<i>Max</i>	14.49	3.48	67.37	1.57	209.54
	<i>Min</i>	1.68	2.13	54.88	0.57	83.88
2	1	1.71	3.13	52.03	0.73	108.06
	2	1.29	2.3	41.64	0.69	85.14
	3	1.58	3.18	49.47	0.81	111.71
	4	1.56	2.67	45.34	1.09	105.15
	5	1.51	2.99	46.78	0.7	108.22
	\bar{x}	1.53	2.854	47.052	0.804	103.656
	<i>Max</i>	1.71	3.18	52.03	1.09	111.71
	<i>Min</i>	1.29	2.3	41.64	0.69	85.14
3	1	1.6	3.1	34.71	1.43	142.55
	2	1.85	3.21	34.27	2.16	144.23
	3	1.85	4.12	39.83	1.5	155.72
	4	1.66	3.57	38.33	2	147.22
	5	1.72	4.33	49.77	2.62	153.31
	\bar{x}	1.736	3.666	39.382	1.942	148.606
	<i>Max</i>	1.85	4.33	49.77	2.62	155.72
	<i>Min</i>	1.6	3.1	34.27	1.43	142.55
4	1	1.57	4.74	50.99	1.42	122.73
	2	1.45	2.72	53.87	1.28	87.62
	3	1.35	2.55	59.5	1.9	85.58
	4	0.6	0.62	16.84	1.05	22.39
	5	0.44	0.45	12.13	0.76	16.29
	\bar{x}	1.082	2.216	38.666	1.282	66.922
	<i>Max</i>	1.57	4.74	59.5	1.9	122.73
	<i>Min</i>	0.44	0.45	12.13	0.76	16.29
5	1	1.32	3.39	58.98	4.44	74.35
	2	1.54	1.98	48.54	2.54	57.23
	3	2.54	2.8	62.62	1.9	125.69
	4	3.43	5.64	144.84	2.74	145.07
	5	4.15	11.08	135.05	2.5	426.3
	\bar{x}	2.596	4.978	90.006	2.824	165.728
	<i>Max</i>	4.15	11.08	144.84	4.44	426.3
	<i>Min</i>	1.32	1.98	48.54	1.9	57.23
\bar{x}		36.39864				

Tabla 5 Concentraciones (ppm) de los metales pesados captados en invierno.

Polígono	Muestra	Arsénico	Cadmio	Cromo	Mercurio	Plomo
1	1	3.57	2.91	116.31	0.8	127.81
	2	4.21	4.19	85.44	0.77	157.89
	3	1.28	0.95	34.99	0.28	38.63
	4	3.53	3	120.62	0.73	112.4
	5	3.66	2.89	592.39	0.78	117.58
	\bar{x}	3.25	2.788	189.95	0.672	110.862
	<i>Max</i>	4.21	4.19	592.39	0.8	157.89
	<i>Min</i>	1.28	0.95	34.99	0.28	38.63
2	1	3.93	6.08	89.68	0.8	171.36
	2	3.48	4.83	98.28	0.73	153.52
	3	3.31	4.47	92.97	0.74	141.46
	4	3.38	4.61	87.93	0.72	149.35
	5	3.41	5.16	94.93	0.75	147.65
	\bar{x}	3.502	5.03	92.758	0.748	152.668
	<i>Max</i>	3.93	6.08	98.28	0.8	171.36
	<i>Min</i>	3.31	4.47	87.93	0.72	141.46
3	1	3.77	4.47	45.66	0.76	176.98
	2	3.79	4.54	47.53	0.79	181.7
	3	3.91	3.73	51.73	0.86	192.21
	4	3.49	4.23	64	0.76	180.3
	5	3.22	4.25	45.03	0.72	165
	\bar{x}	3.636	4.244	50.79	0.778	179.238
	<i>Max</i>	3.91	4.54	64	0.86	192.21
	<i>Min</i>	3.22	3.73	45.03	0.72	165
4	1	2.75	3.51	88.2	0.66	128.69
	2	2.76	3.25	83.83	0.71	120.16
	3	2.46	3.25	78.93	0.69	118.59
	4	2.84	3.33	90.1	0.7	125.79
	5	2.7	3.14	87.88	0.65	121.73
	\bar{x}	2.702	3.296	85.788	0.682	122.992
	<i>Max</i>	2.84	3.51	90.1	0.71	128.69
	<i>Min</i>	2.46	3.14	78.93	0.65	118.59
5	1	2.39	3.98	46.67	0.99	143.99
	2	2.64	3.19	54.55	0.96	127.49
	3	2.59	3.45	54.12	0.87	139.47
	4	1.49	2.25	32.58	1.89	94.32
	5	1.54	3.13	33.04	2.38	154.29
	\bar{x}	2.13	3.2	44.192	1.418	131.912
	<i>Max</i>	2.64	3.98	54.55	2.38	154.29
	<i>Min</i>	1.49	2.25	32.58	0.87	94.32
\bar{x}		47.96904				

Valores globales de metales pesados

Al analizar las concentraciones globales, se observó que el valor máximo registrado fue 678.08 ppm de plomo, el segundo elemento con mayor valor fue el cromo con 10368.5 ppm, mientras que el valor más bajo corresponde al mercurio con 0.12 ppm. Como se observa existe una clara tendencia del plomo en ser el elemento con mayor concentración en comparación con el mercurio que presentó los valores más bajos (Fig. 10).

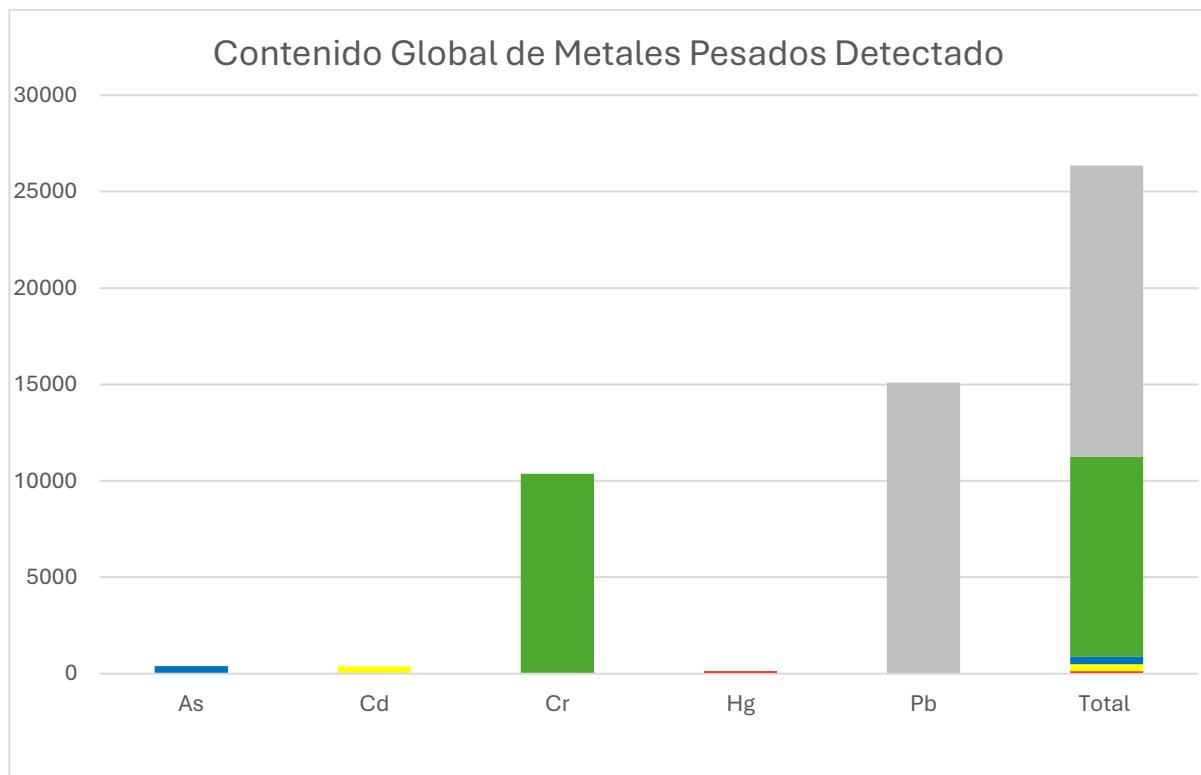


Figura 10. Concentraciones (ppm) anuales acumuladas de metales pesados en Cd. Universitaria, UANL.

En cuanto a los datos globales por polígono se detectó que el polígono cinco presentó la mayor concentración de contaminantes, su concentración total de metales acumulados fue de 6425.11 ppm, seguido por los polígonos cuatro y uno. En contraste, el polígono con la menor concentración fue el 2, donde se registró una concentración total de 4585.9 ppm lo que indica una variación espacial en la distribución de metales pesados entre los diferentes sitios muestreados (Fig. 11).

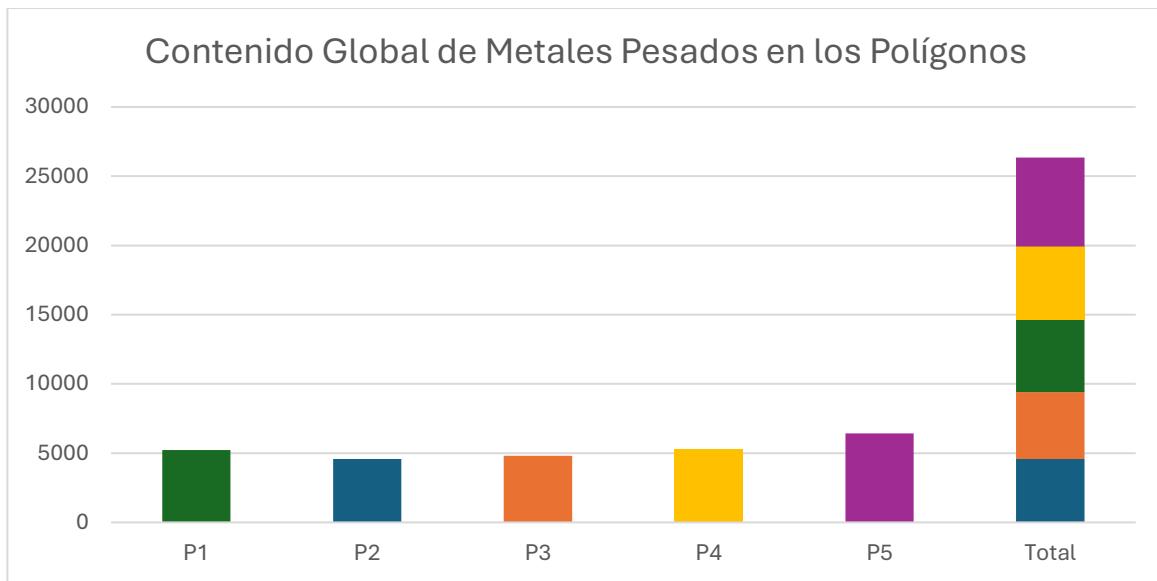


Figura 11. Concentraciones (ppm) anuales acumuladas de metales pesados en los polígonos.

Al llevar a cabo el análisis de los datos de las estaciones, se observaron variaciones en las concentraciones entre las 4 estaciones evaluadas. Los cuales muestran que la primavera fue la estación que presentó la mayor concentración de metales pesados con 10537.2 ppm, seguida por el invierno y el verano. En contraste, el otoño registró menor presencia de metales, su concentración total fue de 4549.83 ppm (Fig. 12).

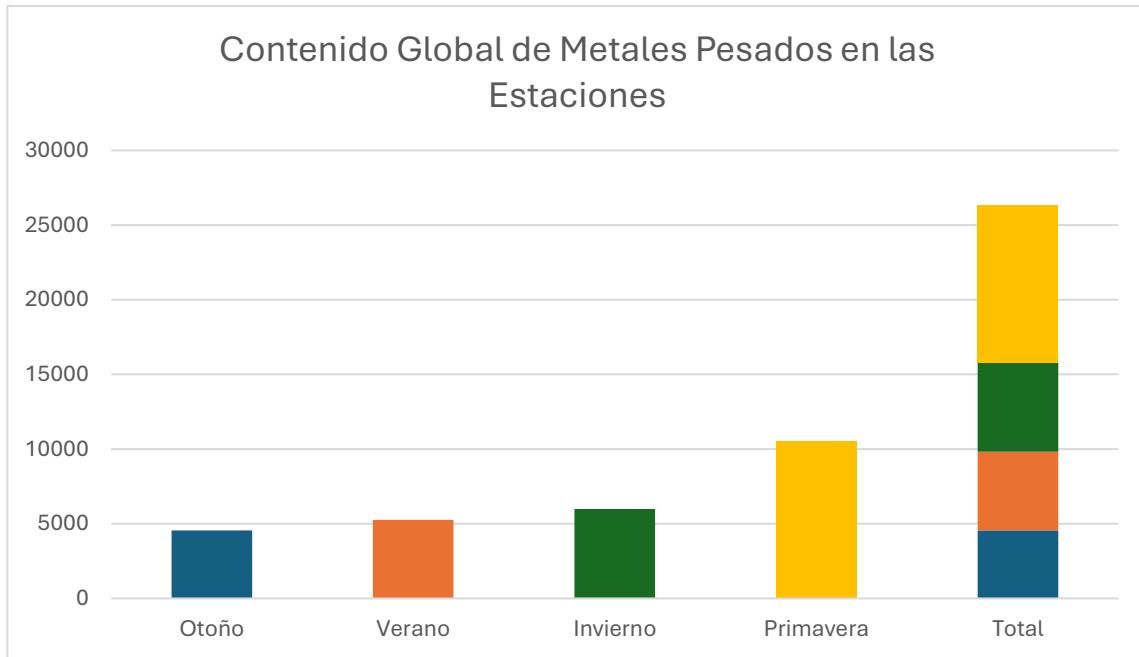


Figura 12. Concentraciones (ppm) anuales acumuladas de metales pesados en las estaciones.

Al analizar los datos se pueden observar claras diferencias entre las concentraciones encontradas entre los diferentes polígonos, en el polígono 5 se registró la mayor concentración de arsénico con 88 ppm, seguido del polígono 4 y 1, el polígono 2 registró el menor valor con 59.05 ppm (Fig. 13).

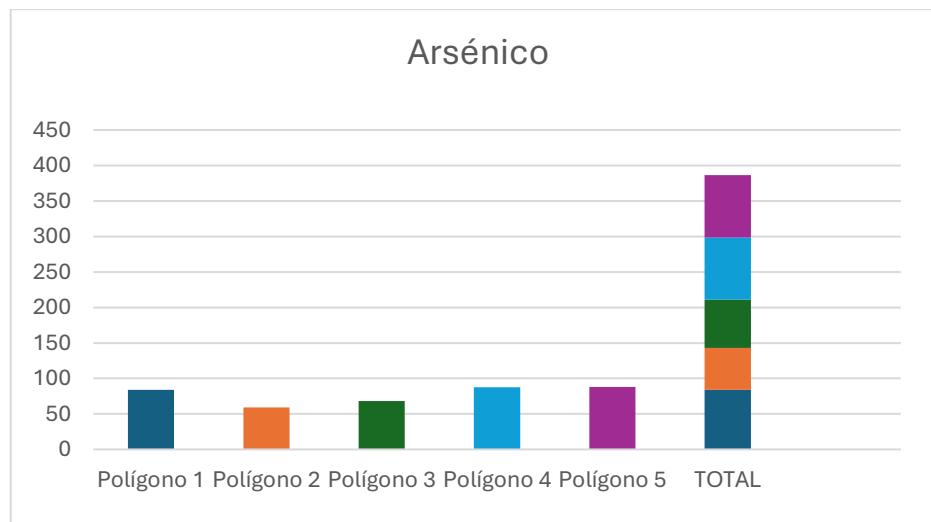


Figura 13. Las concentraciones de arsénico (ppm) por polígonos.

En los valores del cadmio parece continuar la tendencia donde el polígono 5 registra la mayor concentración con 99.49 ppm, el polígono 1 y 2 son los que registraron las menores concentraciones con 53.72 ppm y 69.12 ppm respectivamente (Fig. 14).

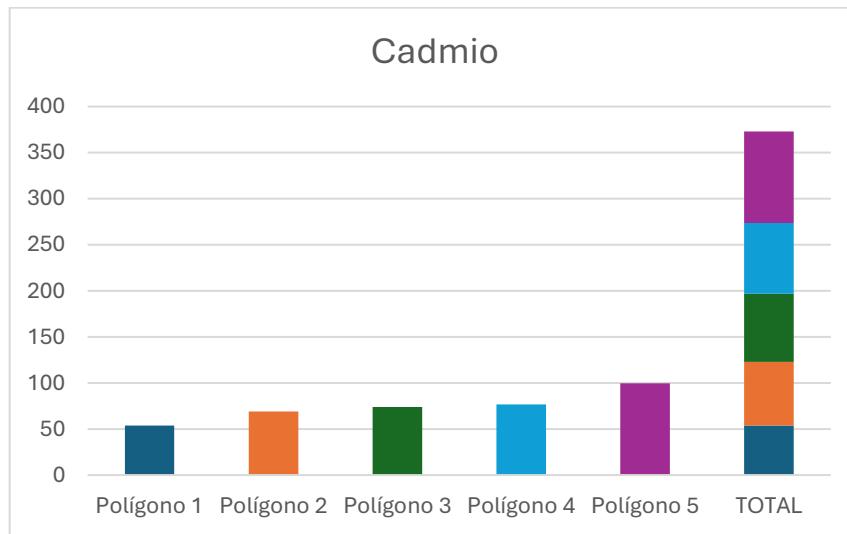


Figura 14. Las concentraciones de cadmio (ppm) por polígono.

El cromo presentó un comportamiento diferente donde el polígono 1 con 2701.51 ppm fue la concentración más alta, seguido del polígono 4 con 2283.91 ppm y el polígono 3 registró la concentración más baja con 1460.12 ppm (Fig. 15).

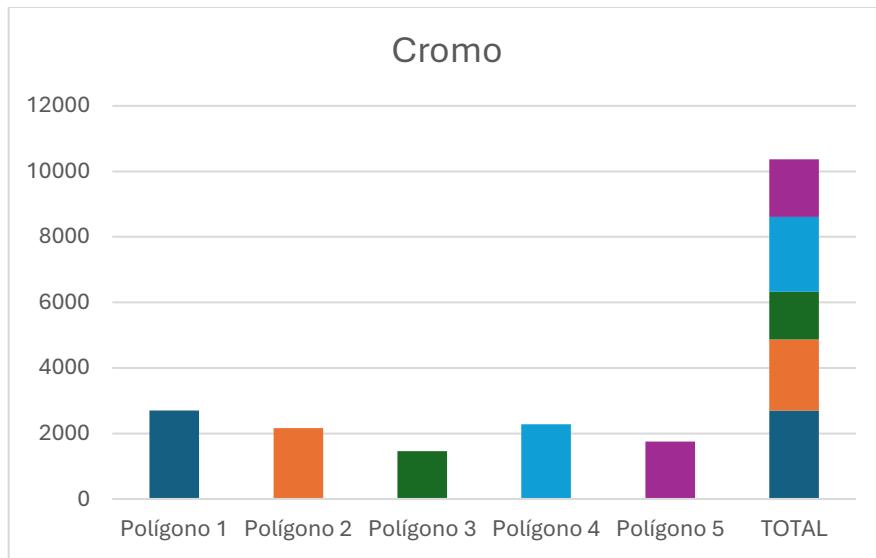


Figura 15. Las concentraciones de cromo (ppm) por polígono.

El mercurio es el metal con menor concentración registrada, siendo su concentración más alta de 50.41 ppm que se presentó en el polígono 5. Por otro lado, el polígono 2 registró el valor más bajo de mercurio 12.58 ppm (Fig. 16).

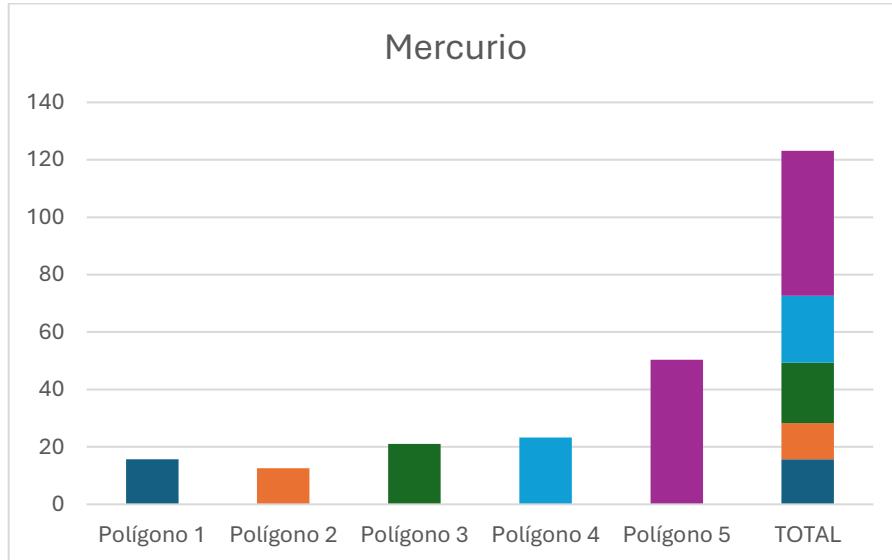


Figura 16. Las concentraciones de mercurio (ppm) por polígono.

El plomo presentó la concentración más alta, alcanzando 4430.81 ppm en el polígono 5. El sitio que presentó menor presencia de plomo fue el polígono 2 con 2278.59ppm (Fig. 17).

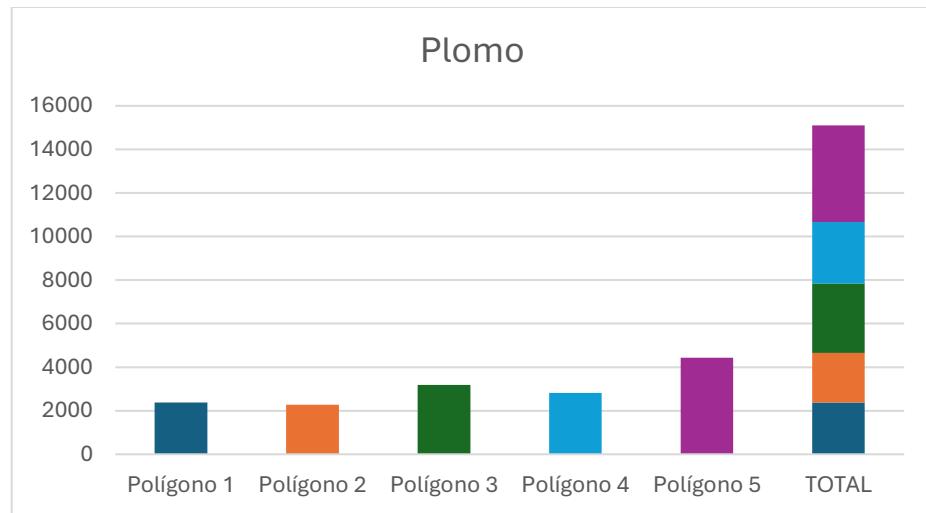


Figura 17. Las concentraciones de plomo (ppm) por polígono.

Al llevar a cabo el análisis de los datos, se identificaron variaciones en las concentraciones observadas entre las 4 estaciones, el arsénico tuvo mayor presencia durante primavera 166.09 ppm y sus valores inferiores ocurrieron en otoño 56.81 ppm. (Fig. 18).

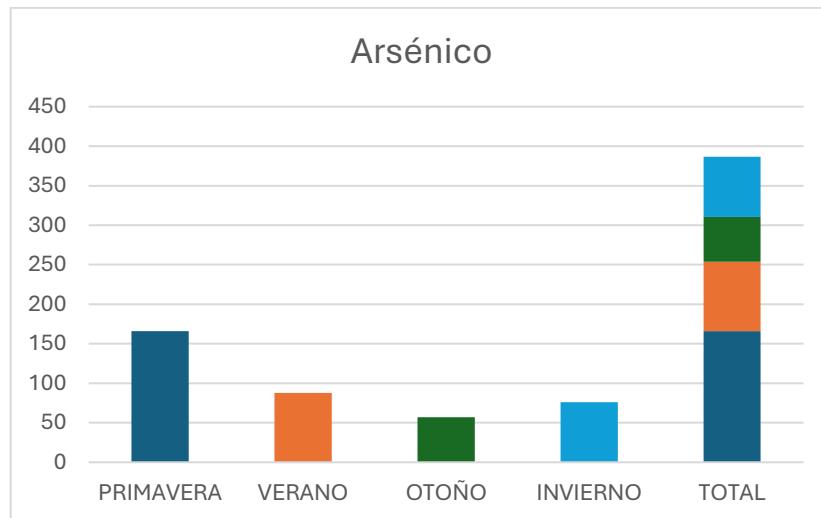


Figura 18. Las concentraciones de arsénico por estación (ppm).

El cadmio tuvo mayor presencia durante primavera 136.59 ppm, la segunda estación con la concentración más alta es el invierno con 92.79 ppm, y los valores inferiores ocurrieron en verano con 62.2 ppm. (Fig. 19).

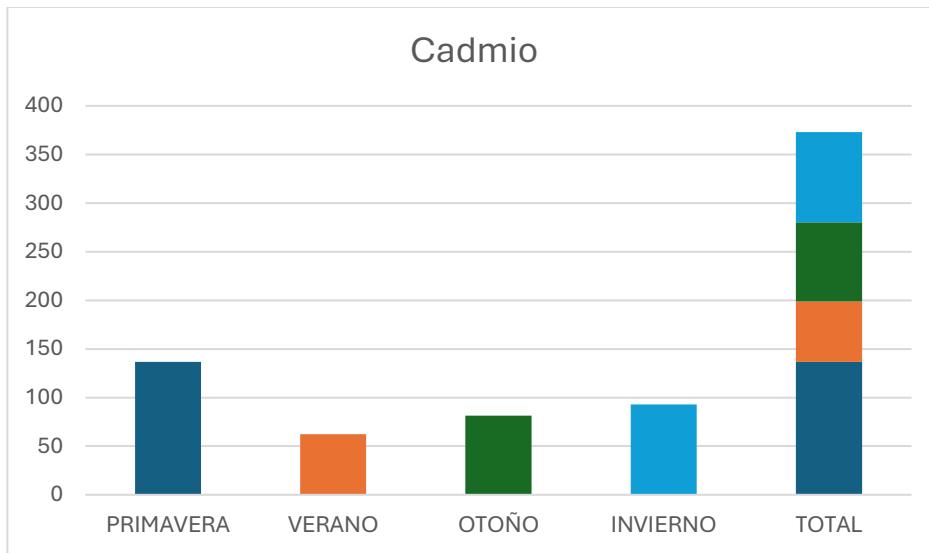


Figura 19. Las concentraciones de cadmio por estación (ppm).

El nivel más alto de cromo que se registró fue en primavera 3908.8 ppm, la segunda estación con la concentración más alta es el verano con 2763.62 y el valor más bajo se registró en verano con 1378.69 ppm. (Fig. 20).

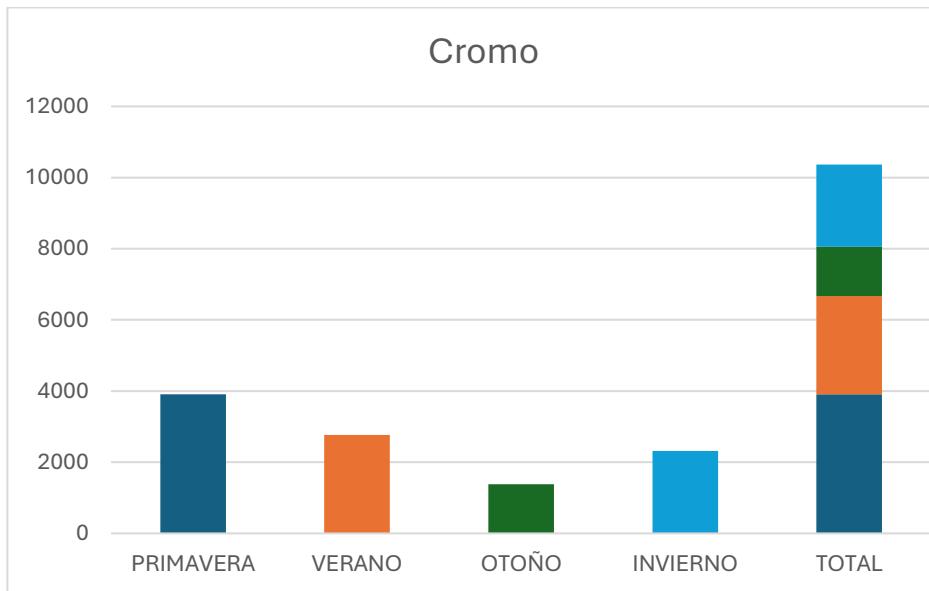


Figura 20. Las concentraciones de cromo estación (ppm).

El mercurio presentó un comportamiento diferente donde la primavera no es la estación con mayor concentración ya que registró 32.61 ppm y en otoño se obtuvo 38.88 ppm. Invierno fue la estación con menor cantidad de mercurio con 21.49 (Fig. 21).

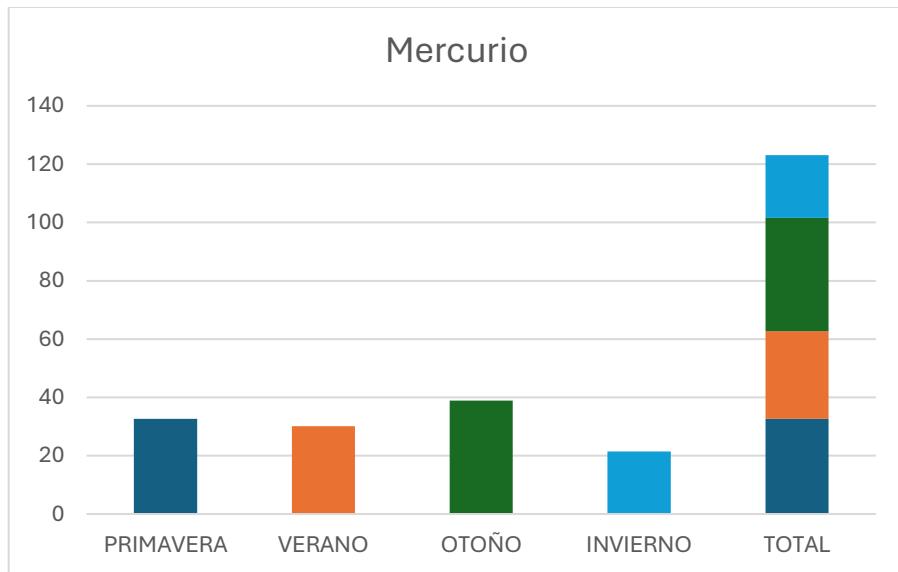


Figura 21. Las concentraciones de mercurio por estación (ppm).

El plomo presentó la mayor concentración en primavera con 6293.11 ppm y en invierno se registró 3488.36 ppm. El verano fue la estación con menor cantidad de mercurio con 2321.66 ppm (Fig. 22).

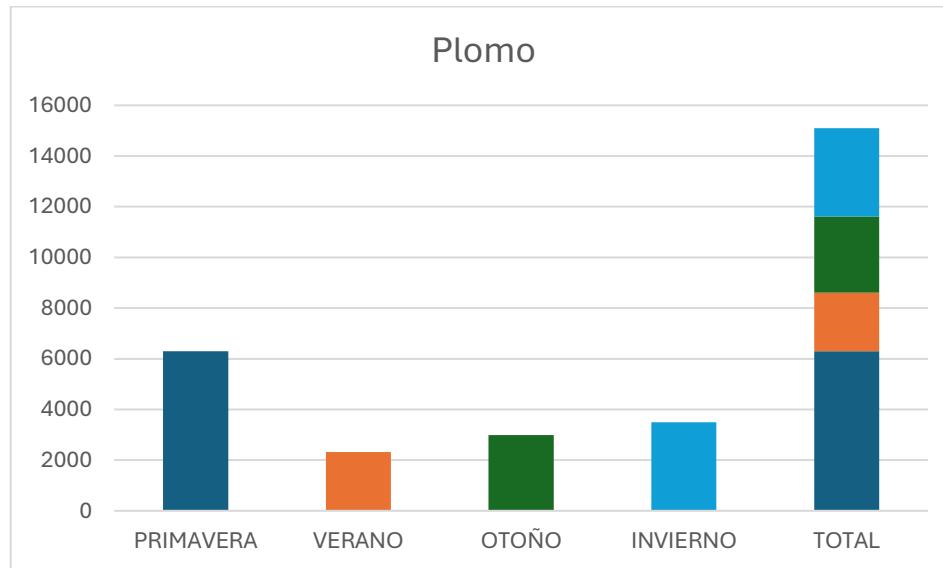


Figura 22. Las concentraciones de plomo por estación (ppm).

Los resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk mostraron desviación significativa de la normalidad en todos los metales analizados con valores de $p = 0.00$ ($\alpha = 0.05$). Por otro lado, las pruebas de Fligner-Killeen indicaron homocedasticidad entre los metales ($\alpha = 0.05$), con valores de p correspondientes a arsénico ($p = 0.59$), cadmio ($p = 0.06$), cromo ($p = 0.09$), mercurio ($p = 0.15$) y plomo ($p = 0.06$) (Tabla 6).

Tabla 6. Resultados de las pruebas de Shapiro-Wilk y Fligner-Killeen

Metal	Shapiro-Wilk	Fligner-Killeen
	Valor de p	Valor de p
As	0.00	0.59
Cd	0.00	0.06
Cr	0.00	0.09
Hg	0.00	0.15
Pb	0.00	0.06

Los resultados de las pruebas de Permanova indican que las concentraciones de los metales retenidos por las hojas de los encinos difieren significativamente entre los siguientes polígonos de muestreo, polígono 1-3 ($\alpha=0.05$, $p=0.02$), polígono 2-3 ($\alpha=0.05$, $p=0.05$) y polígono 2-5 ($\alpha=0.05$, $p=0.04$) (Tabla 7). Los resultados del análisis SIMPER permitieron identificar los metales que más contribuyeron a la disimilitud entre los polígonos. El cromo fue el principal metal responsable de estas diferencias, con una contribución promedio del 31% en las comparaciones entre los polígonos 1-2, 1-3 y 2-3. El segundo metal con mayor aporte fue el plomo, cuya mayor contribución a la disimilitud se observó entre los polígonos 4-5, con un valor del 26% (Tabla 7).

Tabla 7. Resultados de las pruebas Permanova y Simper de los polígonos.

Polígonos	Simper						Permanova
	Cr	Pb	As	Hg	Cd	Total	P. ajustada
P1 - P2	0.31	0.22	0.19	-	-	0.74	1
P1 - P3	0.31	0.22	0.16	-	-	0.7	0.02*
P1 - P4	0.27	0.23	0.21	-	-	0.73	1
P1 - P5	0.22	0.23	0.18	0.19	-	0.84	0.1
P2 - P3	0.31	0.22	-	0.17	-	0.71	0.05*
P2 - P4	0.27	0.24	0.2	-	-	0.71	1
P2 - P5	0.21	0.23	0.16	0.21	-	0.84	0.04*
P3 - P4	0.26	0.24	0.2	-	-	0.72	1
P3 - P5	0.21	0.23	0.19	0.2	-	0.84	0.87
P4 - P5	0.23	0.26	0.19	-	0.17	0.86	1

Las pruebas estadísticas de Permanova revelaron la existencia de diferencia significativa entre las estaciones, como se observa en primavera-verano ($\alpha=0.05$, $p=0.00$), primavera-otoño ($\alpha=0.05$, $p=0.00$), primavera-invierno ($\alpha=0.05$, $p=0.00$), verano-otoño ($\alpha=0.05$, $p=0.00$), verano-invierno ($\alpha=0.05$, $p=0.00$) y otoño-invierno ($\alpha=0.05$, $p=0.01$), lo cual demuestra que las concentraciones de los metales analizados (As, Cd, Cr, Hg y Pb) varían a través de las cuatro temporadas (Tabla 8). Los resultados del análisis Simper identificaron los metales que más contribuyeron a la disimilitud entre las estaciones. El cromo fue el metal que, con mayor frecuencia, explicó las diferencias entre estaciones, destacando su mayor aporte entre verano y otoño, con un 32%. El segundo metal con mayor contribución fue el plomo, cuya participación más alta se observó entre primavera y verano, con un 31% de la disimilitud total (Tabla 8).

Tabla 8. Resultados de las pruebas Permanova y Simper de las estaciones.

Estaciones	Simper						Permanova P. ajustada
	Cr	Pb	As	Hg	Cd	Total	
primavera - verano	-	0.31	0.16	0.16	0.19	0.84	0.006*
primavera - otoño	0.27	0.21	0.23	-	-	0.72	0.006*
primavera - invierno	0.29	0.2	0.21	-	-	0.71	0.006*
verano – otoño	0.32	0.2	0.22	-	-	0.75	0.006*
verano - invierno	0.3	0.27	-	-	0.18	0.75	0.006*
otoño - invierno	0.26	0.23	0.2	-	0.15	0.85	0.012*

DISCUSIÓN

Los encinos contaron con la capacidad de captación del polvo atmosférico porque poseen ciertas características que lo favorecen, algunas de estas son la forma de la hoja, los encinos tienen diferentes formas de hoja, se ha encontrado que la forma lanceolada favorece la captación del polvo, las hojas también cuentan con una superficie rugosa con cutícula cerosa y tricomas (Dalmasso et al. 1997; Esposito et al. 2020)

Polígonos

La presencia de arsénico en las muestras tomadas se puede explicar por la cercanía que tienen las vías férreas donde se lleva a cabo la quema de carbón y por la nave industrial metalúrgica donde realizan fundición de metal (Montoya et al. 2015). Las fuentes del cadmio corresponden a la nave industrial ya que se utiliza en la galvanización del metal y al del uso de combustibles fósiles como el transporte lo cual concuerda con las grandes vialidades cercanas al campus y los amplios estacionamientos con los que cuenta (Pérez y Azcona 2012). El cromo se puede deber de igual manera a la nave industrial porque se usa para producir acero inoxidable y como recubrimiento para evitar la corrosión (Marín 2017). El mercurio se puede deber a la producción de acero por la industria metalúrgica y el transporte (López y Chamiz 2023). El plomo se puede deber a la incineración de residuos, industria y producción de energía (Pacyna et al. 2009).

Las altas concentraciones de plomo se deben a las fuentes contaminantes que emiten este metal. La industria de las baterías se encuentra presente en el estado con diferentes plantas y con plantas dentro de la ZZM. En la producción de baterías de automóviles, el plomo es una de las principales materias primas, las baterías de plomo son las más utilizadas ya que al ser reciclables son más económicas que otras opciones (Cueva et al. 2018), en Nuevo León se encuentran dos plantas de centro de reciclaje de baterías, en García y Ciénaga de

Flores. La industria energética es otra que emite plomo, para la generación de energía eléctrica se utiliza combustibles fósiles, las termoeléctricas pueden utilizar diferentes tipos de materia pero carbón, gas natural y combustóleo son las que producen la contaminación por plomo, debido a que los combustibles contienen impurezas (metales pesados) (Zuk et al. 2006), en el estado se ubican varias plantas en San Nicolas de los Garza, Monterrey y Pesquería. La gestión de residuos provoca contaminación por plomo ya que dentro de sus procesos la práctica de la incineración es de las más populares porque es el exterminio del residuo mediante su combustión que emite partículas (plomo) y gases, existen técnicas y legislación para evitar contaminación al ambiente, pero el mal manejo puede provocar que las emisiones sean liberadas (Díaz 1996). En Apocada se encuentra una planta de manejo de residuos.

La contaminación no solo se origina cerca o en el interior de Ciudad Universitaria, esta puede ser emitida en otra zona como las fuentes que emiten mercurio, varias plantas cementeras y centrales eléctricas se ubican dentro de la ZMM, algunas de las fuentes contaminantes más lejanas son la refinería de Cadereyta (López y Chamiz 2023). A pesar de la distancia, las partículas llegan a trasladarse a través del viento lo cual permite la dispersión de los contaminantes a otros sitios (Arrieta 2016). Por otro lado, la distancia que recorren las partículas entre las fuentes emisoras y el campus universitario, hasta su deposición sobre las hojas de los árboles, implica perdida de partículas (Memoli et al. 2020).

Estas diferencias significativas se pueden explicar por la ubicación de los polígonos, los más cercanos a vialidades de alto tráfico vehicular son el polígono 1, 3 y 5, el polígono 2 consiste en un amplio estacionamiento. La contaminación por los vehículos motorizados es responsable en gran parte por la degradación de la calidad del aire en diferentes ciudades como Valle de Aburrá (Toro et al. 2001) y La Habana (Cuesta et al. 2017). Además, los principales contaminantes liberados por la combustión de los automóviles son el material particulado (Cuesta et al. 2017) y metales pesados como plomo, zinc y cromo (Machado et al. 2008). Por otro lado, el análisis de permanova también permitió

identificar que la mayoría de las comparaciones entre polígonos no presentan diferencia entre ellos, esto se puede explicar ya que son cercanos, se encuentran dentro de un área con superficie de 944,723.77 m² (UANL 2018) y el movimiento de las partículas llega a ser similar entre los polígonos debido a que el viento dispersa las partículas (Wu et al. 2022). Sin embargo, aquellas comparaciones donde se encontró diferencia señalan que, a pesar de la proximidad de los polígonos, algunos de estos difieren.

Estaciones

En otros estudios se ha reportado que en la temporada invernal se encuentran las concentraciones de contaminantes más altas (Bodor et al. 2020). Para zonas industriales y zonas urbanas se ha reportado que la temporada de invierno es la que mayormente presenta las más altas concentraciones de contaminantes de PM10 y PM2.5 (Nakfa et al. 2025), esto debido a que en esta época las condiciones son favorables para su incremento como la ocurrencia de las inversiones térmicas que aumentan en invierno y primavera que abarcan los meses de noviembre hasta mayo (García et al. 2012). En una investigación donde se indica que en febrero se registró la mayor concentración de PM10, seguido de enero y diciembre, en ese estudio, la incidencia de inversiones térmicas influyó en las concentraciones de los contaminantes (Bodor et al. 2020). Un estudio indica que las inversiones térmicas que ocurren en la parte inferior de la troposfera se presentan con mayor frecuencia en primavera, este tipo de inversión térmica provoca un veloz aumento de contaminantes (Yavuz 2025). Del mismo modo, nuestros resultados con influencia de inversiones térmicas mayormente presentes en primavera provocó que esta temporada presentara las más altas concentraciones. Otro estudio indica que la temperatura se correlaciona positivamente con las PM10 (Rojano et al. 2012). En el estado, enero es el mes que registra las temperaturas más frías (INEGI 1986), por lo que los meses más cálidos que enero podrían presentar condiciones adecuadas para el aumento de la contaminación por PM10.

En un estudio del 2025, se ha indicado que las concentraciones de los contaminantes más bajas ocurrieron en temporadas de lluvia, las precipitaciones tienen una función depuradora de PM10 y PM2.5 (Nakyai et al. 2025). En Nuevo León las precipitaciones se presentan en verano y su máxima incidencia ocurren en septiembre, el resto del año son escasas, los meses diciembre, enero y marzo son los que tienen menor cantidad de precipitaciones tienen (INEGI 1986). Lo anterior concuerda con nuestros resultados ya que las concentraciones más bajas ocurrieron en otoño ($\bar{x} = 36.39$), los muestreos correspondientes a otoño se realizaron después de la temporada de lluvia, por lo que las hojas lavas por efecto de las precipitaciones presentaron menor concentración de metales.

Otro factor que influyó en las bajas concentraciones de otoño es el viento. La velocidad, dirección y turbulencia del viento tienen gran influencia en la dispersión de los contaminantes, por lo que la ausencia de viento no permite que las partículas se dispersen (Arrieta 2016; García et al. 2014) debido a ello no logran llegar hasta los polígonos, en San Nicolas de los Garza los vientos más lentos ocurren en diciembre. La época más ventosa comprende desde marzo hasta septiembre (primavera y verano) (Weather Spark 2025) en el caso de primavera, el viento influyó con el transporte de los contaminantes provocando mayores concentraciones en las hojas.

Los climas que dominan en el estado son de baja humedad (INEGI 1986) y la humedad relativa se correlaciona negativamente con las concentraciones de PM10 (Rojano et al. 2012) por lo que en general el clima de la región favorece la contaminación de PM10.

En otro estudio sobre las emisiones de vehículos se indicó que los metales con dispersión favorable fueron cromo y plomo porque se encontró concentraciones mayores en la zona donde las partículas metálicas se emitieron, que en las zonas donde los contaminantes se capturaron (Machado et al. 2008).

Normativa Mexicana

Dentro de la normatividad mexicana que regula la calidad del aire se encuentran la NOM-025-SSA1-2014 tiene como objetivo establecer los valores permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} que se localizan en el aire ambiental, su aplicación es de observancia obligatoria, las instituciones que deben vigilar su cumplimiento son secretaría de salud y gobierno estatal, su propósito es preservar la salud de la población.

Los límites que indica para PM₁₀:

- Límite de 24 horas: 75 µg/m³ (promedio de 24 horas).
- Límite anual: 40 µg/m³ (promedio anual)

Los límites que indica para PM_{2.5}:

- Límite de 24 horas: 45 µg/m³ (promedio de 24 horas).
- Límite anual: 12 µg/m³ (promedio anual).

Otra norma de interés es la NOM-026-SSA1-2021, su objetivo es fijar el límite permisible de la concentración de plomo en el aire ambiente para protección de la población al igual que la norma anterior es de observancia obligatoria.

Los límites que indica para plomo:

- Límite anual: 50 µg/m³(a partir de PM₁₀).

La normativa no cuenta con límites permisibles comparables con los resultados obtenidos en nuestro estudio debido a que estas se basan en datos tomados por hora y nuestros datos corresponden a temporadas, además nosotros no medimos el tamaño de las partículas para hacer una distinción entre estas.

CONCLUSIÓN

Este estudio nos permitió conocer la concentración de los metales pesados (As, Cd, Cr, Mn, Hg y Pb) a partir del material particulado depositado en las hojas de encino, cumpliéndose el objetivo general de esta investigación, con lo que se reveló la presencia de los cinco metales en los polígonos de muestreo y su presencia persiste a través de las cuatro temporadas, lo que indica que las emisiones contaminantes logran llegar a diferentes zonas en el campus de ciudad universitaria, esto implica que en el medio se encuentran disponibles este tipo de contaminantes que pueden ser inhalados y provocar daños a la salud.

Se evaluó la existencia de diferencias de la concentración de los metales pesados entre los distintos polígonos de estudio mediante las pruebas estadísticas realizadas de Permanova las cuales revelaron que las concentraciones de los metales presentaron variación en algunos polígonos (1-3, 2-3 y 2-5). Estas variaciones se presentaron debido a las diferentes fuentes contaminantes ya que algunos polígonos se encuentran más cercanos a cierto tipo de fuentes que emiten algunos tipos de metales en específico, además que las fuentes variarían sus emisiones, en algunas liberar al medio altas o bajas concentraciones.

Se logró determinar la variación estacional en la concentración de los metales pesados entre los diferentes polígonos y se encontró que en todas las temporadas existe diferencia significativa, lo cual nos indica que las condiciones meteorológicas características de las temporadas tienen una gran influencia en el comportamiento del material particulado, entre ellas la temperatura, la lluvia, humedad, pero se resalta el viento como el factor principal según indican distintos autores.

Por otra parte, también se distinguió que el plomo fue el metal con mayor concentración y el metal con menor concentración fue el mercurio. Esto es relevante debido a que nos permite tener mayor comprensión sobre los contaminantes que afectan el campus.

Esta investigación nos ha permitido conocer donde se ubican las zonas con mayor concentración de contaminación, así como distinguir el efecto de dispersión que tiene el viento sobre las partículas contaminantes dentro de ciudad universitaria, con esta información se puede establecer estrategias eficientes que mitiguen la contaminación.

PRESPECTIVAS

Este estudio nos permitió conocer cómo se distribuye la contaminación por metales pesados dentro del campus de Ciudad Universitaria, cómo varían sus concentraciones según la temporada y cómo la vegetación, específicamente los encinos, actúa como un filtro natural que retiene estas partículas. A partir de estos resultados, se abren varias posibilidades para futuras investigaciones.

Una de ellas sería la identificación más precisa de las fuentes contaminantes, lo cual aportaría información clave para entender de dónde provienen estos metales. También se podrían estudiar otros metales pesados o distintos tipos de contaminantes atmosféricos, con el objetivo de obtener un panorama más completo.

Además, es importante realizar investigaciones que permitan conocer mejor las necesidades del sitio desde diferentes perspectivas, realizando muestreos en otras zonas del campus y utilizando otras especies vegetales, con el fin de comparar resultados e identificar cuál de ellas funciona mejor como biomonitor ambiental.

Otra línea relevante sería la implementación de diferentes métodos de captación de partículas. Asimismo, se recomienda seguir monitoreando las concentraciones de metales pesados año con año, para poder hacer comparaciones y observar su comportamiento a lo largo del tiempo, es decir, si han aumentado, disminuido o se mantienen estables.

Finalmente, ampliar este tipo de estudios a otras zonas dentro de la Zona Metropolitana de Monterrey ayudaría a identificar aquellas áreas donde se podrían implementar soluciones basadas en la naturaleza para mejorar la calidad del aire.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta LE, Reyes H, Muñoz CA, Leija EG. (2019). Distribución y conservación de *Quercus oleoides* Schltdl. & Cham. en la Reserva de la Biosfera Sierra del Abra Tanchipa. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 10.
- Anderson MJ. 2017. Permutational Multivariate Analysis of Variance (PERMANOVA). Wiley StatsRef: Statistics Reference 1-15.
- Andrew RM. 2018. Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2017. Earth System Science Data, 10; 2213–2239.
- Angulo LC, Huertas JI, Restrepo GM. 2011. Caracterización de partículas suspendidas (pst) y partículas respirables (pm 10) producidas en áreas de explotación carbonífera a cielo abierto. Información Tecnológica 22:23-34.
- Aragón A, Campos AA, Leyva R, Hernández M, Miranda N. 2006. Influencia de emisiones industriales en el polvo atmosférico de la ciudad de San Luis Potosí, México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 22:5-19.
- Arrieta AJ. 2016. Dispersión de material particulado (PM10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. Ingeniería Investigación y Desarrollo 16:43-54.
- Astorga FR. 2010. Utilización de follaje de *Pinus halepensis mill.* como bioindicador de contaminación atmosférica por material particulado. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
- Ballester F. 2005. Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. Revista Española de Salud Pública 79:159-175.
- Becerra LA, Ramos RA. (2020). Evaluación del impacto en la salud por partículas PM2.5 en Sinaloa, México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 36:249-259.
- Bodor Z, Bodor K, Keresztesi Á, Szép R. 2020. Major air pollutants seasonal variation analysis and long-range transport of PM10 in an urban environment with specific climate condition in Transylvania (Romania). Environmental Science and Pollution Research 27:38181-38199.

Calderón D, Hernández JL, Castilla L, Hernández E, Barragán G, Rodríguez RA, Villegas G. 2000. El ozono como molécula reactiva. Concepto actual. Perinatol Reprod Hum 14:115-123.

Candelone JP, Hong S, Pellone C, Boutron C. 1995. Post industrial revolution changes in large-scale atmospheric pollution of the northern hemisphere by heavy metals as documented in central Greenland snow and ice. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 100:16605-16616.

Capasso L. 1995. Documentazioni paleopatologiche dell'inquinamento atmosferico nell'antichità. Journal of History of Medicine 7:435-444.

Carrillo J. 2020. Informe anual de la tendencia de la calidad del aire en la Zona Metropolitana de Monterrey 2020. Dirección de gestión integral de la calidad del aire secretaría de desarrollo sustentable de Nuevo León 1-34.

Clima San Nicolás de los Garza: Temperatura, Climograma y Tabla climática para San Nicolás de los Garza. 2021. San Nicolás de los Garza, [Online]. Disponible en: <https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico/nuevo-leon/san-nicolas-de-los-garza-5747/>

Cubillas AC, Torres R, Díaz F, Carrizales L, Coronado C, Nieto LM, Moreno AR, Barraza L. 2011. Diseño y aplicación de un Programa de Comunicación de Riesgos para la salud ambiental infantil en un sitio contaminado con plomo y arsénico. Ciêncie & Saúde Coletiva 16:4115-4126.

Cuesta O, Bolufe J, Gonzalez Y, Sosa C, Carrillo E, Manso R, Madrazo J, Clappier A, Barcarcel C, Franhouser R. 2017. Contaminación atmosférica por fuentes móviles en la calle Reina, La Habana. Revista Cubana de Meteorología 23:78-88.

Cueva E, Lucero J, Guzmán A, Rocha J, Espinoza L. 2018. Revisión del estado del arte de baterías para aplicaciones automotrices. Enfoque UTE 9:166-176.

Dalmasso A, Candia R, Llera J. 1997. La vegetación como indicadora de la contaminación por polvo atmosférico. Multequina 6:85-91.

- Deng H, Tu Y, Wang H, Wang Z, Li Y, Chai L, Zhang W, Lin Z. 2022. Environmental behavior, human health effect, and pollution control of heavy metal(loid)s toward full life cycle processes. *Eco Environ Health*. 1:229-243.
- Díaz F. 1996. Los residuos peligrosos en México. Evaluación del riesgo para la salud. *Salud Pública de México* 38:280-291.
- Eon J, Jun Y, Myung Ch, Chang S. 2021. Seasonal Changes in the Absorption of Particulate Matter and the Fine Structure of Street Trees in the Southern Areas, Korea: With a Reference to *Quercus myrsinifolia*, *Quercus glauca*, *Quercus salicina*, *Camellia japonica*, and *Prunus x yedoensis*. *Journal of Korean Society of Forest Science* 110:129-140.
- Esposito F, Memoli V, Panico SC, Di Natale G, Trifuggi M, Giarra A, Maisto G. 2020. Leaf traits of *Quercus ilex* L. affect particulate matter accumulation. *Urban Forestry & Urban Greening* 54.
- Fligner MA, Killeen TJ. 1976. Distribution-free two-sample tests for scale. *Journal of the American Statistical Association* 71:210–213.
- Galván LE, Guédez C, Reyes RE, De Armas D. 2007. Los macroprocesos de la industria petrolera y sus consecuencias ambientales. *Universidad, Ciencia y Tecnología* 11:91-97.
- Galván LE, Reyes RE. 2009. Algunas herramientas para la prevención, control y mitigación de la contaminación ambiental. *Universidad, Ciencia y Tecnología* 13: 287-294.
- García M, Ramírez H, Ulloa H, Arias S, Pérez A. 2012. Las inversiones térmicas y la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de Guadalajara (México). *Investigaciones Geográficas* 9-29.
- García M, Ulloa H, Ramírez H, Fuentes M, Arias S, Espinosa M. 2014. Comportamiento de los vientos dominantes y su influencia en la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 1:97-116.
- González RM, Díaz H, Ibarra EJ, Novas AJ, Guevara ME. (2024). Evaluación de la contaminación laboral por gases y aerosoles inorgánicos en áreas de la refinería de petróleo ‘Nico López’. *Revista Cubana de Salud y Trabajo* 5:22-25.

Hernández CN, Ávila A, Cerda DG. 2022. Impacto de la movilidad urbana en la calidad del aire de la zona metropolitana de San Luis Potosí, México. Revista de Ciencias Ambientales 57:1-27.

Hernández J, Arriola J, Juárez RM. 2016. Análisis de metales pesados en Parque Estatal “Flor del Bosque”. Ra Ximhai 12:43-56.

INEGI. 2010. Compendio de información geográfica municipal 2010 San Nicolás de los Garza Nuevo León, [Online]. Disponible en: http://www.inafed.gob.mx/wb2/ELOCAL/ELOC_Enciclopedia

Instituto Nacional de Estadística Geografía e informática. 1986. Síntesis geográfica de Nuevo León. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1-171.

Leal J. 2019. Efectos físicos de la contaminación atmosférica percibidos de manera inconsciente por la ciudadanía, en el área metropolitana de la ciudad de Monterrey, Nuevo León, México. Revista de Salud Pública 21: 423-429.

Leal ML, Bastidas PJ, Cruz E, Aguilar EE, Perea XP, Martínez IG, Leyva JB. 2022. Pesticides in water and sediments of Chacahua-Pastoria Lagoon System, Oaxaca, México. Marine Pollution Bulletin 174:113177.

Londoño LF, Londoño PT, Muñoz FG. 2016. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial 14:145-153.

López RI, Chamizo HA. 2023. Exposición a la contaminación antropogénica por mercurio y sus efectos en la salud. Revista de Ciencias Ambientales 57:1-24.

Łukowski A, Popek R, Karolewski P. 2020. Particulate matter on foliage of *Betula pendula*, *Quercus robur*, and *Tilia cordata*: Deposition and Ecophysiology. Environmental Science and Pollution Research 27:10296-10307.

Machado A, García N, García C, Acosta L, Córdova A, Linares M, Giraldoth D, Velásquez H. 2008. Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. Rev. Int. Contam. Ambient. 24:171-182.

Marín R. 2017. Sobre la sustitución de la DQO por el COT para medidas de la materia orgánica en aguas residuales: Ventajas e inconvenientes. RETEMA. 64-71

Martínez A. 2017. Captura de material particulado en hojas de árboles del municipio de Toluca, Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México.

Mastandrea C, Chichizola C, Ludueña B, Sánchez H, Álvarez H, Gutiérrez A. 2005. Hidrocarburos aromáticos policíclicos. Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana 39:27-36.

Mayora F. 2019. Contaminación del aire en Monterrey, Nuevo León: Interpretación del monitoreo ambiental 2005-2018. Revista de Investigación 43:209-234.

Medina HL, Vega DE. 2019. Afectación de la salud humana por el deterioro de la calidad del aire debido a la emisión de contaminantes atmosféricos. Revista Matices Tecnológicos 22-28.

Memoli V, Esposito F, Santorufo L, Panico SC, Trifuggi M, Di Natale G, Maisto G. 2020. Relationships between leaf exposure time to air pollution and metal and particulate matter accumulation for holm oak leaves. Water, Air, And Soil Pollution 231:529.

Mendoza JC, Arriola J, Pérez G, Silveti Á, Vega M, Portillo AL, Jaramillo O, Morales R. 2016. Análisis de Metales Pesados en Parque Estatal “Flor del Bosque”. Ra Ximhai 12:43-55.

Mirsadraee M. 2014. Anthracosis of the Lungs: Etiology, Clinical Manifestations and Diagnosis: A Review. Tanaffos 13:1-13.

Molina E, Cuba D. 2006. Contaminación del aire interior en un proyecto de viviendas con climatización centralizada. Revista Cubana de Higiene y Epidemiología 44.

Montoya NP, Casas PA, Cordovez C. 2010. Plomo, Cromo III y Cromo VI y sus efectos sobre la salud humana. Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular, 8:77-88.

Najib R, Houri T, Khairallah Y, Khalil M. 2022. Effect of dust accumulation on Quercus cerris L. leaves in the Ezer Forest, Lebanon. iForest 15:322-330.

Nakyai T, Santasnachok M, Thetkathuek A, Phatrabuddha N. 2025. Influence of meteorological factors on air pollution and health risks: A comparative analysis of industrial and urban areas in Chonburi Province, Thailand. Environmental Advances 19:1-9.

Organización Mundial de la Salud. 2024. Las nuevas Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire [Online]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>

Pacyna JM, Pacyna EG, Aas W. 2009. Changes of emissions and atmospheric deposition of mercury, lead, and cadmium. *Atmospheric Environment* 43:117-127.

Patel K, Chaurasia M, Rao, KS. 2022. Heavy metal accumulation in leaves of selected plant species in urban areas of Delhi. *Environmental Science and Pollution Research International* 30:27622–27635.

Pava PA. 2020. Vegetación urbana como estrategia para reducir la contaminación del aire en áreas urbanas. Universidad Militar Nueva Granada.

Pedrosa I, Juarros J, Robles A, Basteiro J, García E. 2014. Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? *Universitas Psychologica* 14:245-254.

Pérez PE, Azcona MI. 2012. Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas* 17:199-205.

Raherison C. 2020. Contaminación atmosférica y medioambiental y patología respiratoria. EMC - Tratado de Medicina 24:1-9

Rangel EA, Montañez LE, Luévanos MP, Balagurusamy N. 2015. Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana* 33:103-118.

Rentier E, Cammeraat L. 2022. The environmental impacts of river sand mining. *Science of The Total Environment*. 838.

Reyes CC. 2010. "El Arbolado de Ciudad Universitaria, a 50 años de su fundación: diversidad, densidad, condición y otros aspectos ecológicos. Universidad Autónoma De Nuevo León.

Rodríguez D. 2017. Intoxicación ocupacional por metales pesados. MEDISAN, 21:3372-3385.

- Rojano R, Pérez J, Freyle E. 2012. Effect of relative humidity in determining PM10 using a DataRam 4 in coastal region of Colombia. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia 35:204-212.
- Royston P. 1995. A Remark on Algorithm AS 181: The W-test for Normality. Journal of the Royal Statistical Society 44:547-551.
- Sawidis T, Breuste J, Mitrović M, Pavlović P, Tsigaridas K. 2011. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. Environmental Pollution 159: 3560-3570.
- Schulze F, Gao X, Virzonis D, Damiati S, Schneider MR, Kodzius R. 2017. Air Quality Effects on Human Health and Approaches for Its Assessment through Microfluidic Chips. Genes (Basel). 8.
- Secretaría de Desarrollo Sustentable Nuevo León. 2016. Programa de respuesta a contingencias atmosféricas: Zona Metropolitana de Monterrey.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2016. Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Nuevo León: ProAire 2016-2025. Monterrey, N.L.: Gobierno del Estado de Nuevo León Secretaría de Desarrollo Sustentable.
- SEMARNAT. 2016. Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Nuevo León: ProAire 2016-2025. Monterrey, N.L.
- Sistema Integral De Monitoreo Ambiental. 2024. Reportes Mensuales, [Online]. Disponible en: https://aire.nl.gob.mx/rep_mensual.html
- Smith K, Balistrieri L, Todd A. 2015. Using biotic ligand models to predict metal toxicity in mineralized systems. Applied Geochemistry. 57:55-72.
- Timothy N, Tagui, E. 2019. Environmental Pollution by Heavy Metal: An Overview. International Journal of Environmental Chemistry 3:72-82.
- Toro MV, Ramírez JJ, Quiceno RA, Zuluaga CA. 2001. Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín mediante factores de emisión corinair*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental 42-49.

- UANL. 2018. Campus Ciudad Universitaria - Universidad Autónoma de Nuevo León. Universidad Autónoma de Nuevo León, [Online]. Disponible en: <https://www.uanl.mx/campus-ciudad-universitaria/>
- Valavanidis A, Fiotakis K, Vlachogianni T. 2008. Airborne particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms. *J Environ Sci Health C Environ Carcinog Ecotoxicol* 4:339-62.
- Weather Spark. 2025. Datos históricos meteorológicos de 2025 en San Nicolás de los Garza, [Online]. Disponible en: <https://es.weatherspark.com/h/y/5148/2025/Datos-hist%C3%B3ricos-meteorol%C3%B3gicos-de-2025-en-San-Nicol%C3%A1s-de-los-Garza-M%C3%A9xico>
- Wieser AA, Scherz M, Passer A, Kreiner H. 2021. Challenges of a Healthy Built Environment: Air Pollution in Construction Industry. *Sustainability* 13.
- WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021. [Online]. Disponible en: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228eng.pdf?sequence=1>
- Wu M, Zhang G, Wang L, Liu X, Wu Z. 2022. Influencing Factors on Airflow and Pollutant Dispersion around Buildings under the Combined Effect of Wind and Buoyancy—A Review. *Environmental Research and Public Health* 19:1-19.
- Xu Y, Yang L, Zheng M, Jin R, Wu X, Li C, Liu G. 2018. Chlorinated and Brominated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Metallurgical Plants. *Environmental Science & Technology* 52:7334-7342.
- Yang X, Yu Q, Zhang Y, Ma W. 2023. Occupational health risk assessment of construction workers caused by particulate matter exposure on construction sites. *Heliyon*. 9.
- Yap BW, Sim CH. 2011. Comparisons of various types of normality tests. *Journal of Statistical Computation and Simulation* 81:2141–2155.

- Yavuz V. 2025. Unveiling the impact of temperature inversions on air quality: A comprehensive analysis of polluted and severe polluted days in Istanbul. *Acta Geophysica* 73:969-986.
- Yglesias M, Chamizo HA. 2013. Riesgo de padecer enfermedades y síntomas respiratorios asociado a la exposición a dióxido de carbono y dióxido de azufre provenientes del volcán Turrialba, Costa Rica. *Universidad de Costa Rica. Horizonte Sanitario* 12:7-13.
- Zhao Ch, Campbell P, Wilkinson K. 2016. When are metal complexes bioavailable?. *Environmental Chemistry* 13:425-433.
- Zhang K, Chai F, Zheng Z, Yang Q, Zhong X, Wadinga K, Zhou G. 2018. Size distribution and source of heavy metals in particulate matter on the lead and zinc smelting affected area. *Environmental Sciences* 71:188–196.
- Zuk M, Garibay V, Iniesta R, López MT, Rojas L, Laguna I. 2006. Introducción a la evaluación de los impactos de las termoeléctricas de México: un estudio de caso en Tuxpan, Veracruz (1.a ed.). Secretaría De Medio Ambiente Editorial Y Recursos Naturales: Instituto Nacional De Ecología 13-117.