



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**BIOMONITOREO DE PARTÍCULAS MAGNÉTICAS
EN CORTEZA DE ÁRBOLES DE LA CIUDAD DE
QUERÉTARO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA
TIERRA**

P R E S E N T A:

GABRIELA VIANNEY LUGO MARTÍNEZ



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. HARALD NORBERT BÖHNEL**

Querétaro, Querétaro, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de Datos del Jurado

1. Datos del alumno
Lugo
Martínez
Gabriela Vianney
442 131 54 54
Universidad Nacional Autónoma de
México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Tierra
416107883
2. Datos del tutor
Dr
Harald Norbert
Böhnel
3. Datos del sinodal 1
Dr
Manuel
Miranda
Anaya
4. Datos del sinodal 2
Dra
Rosa Gabriela
Castaño
Meneses
5. Datos del sinodal 3
Dra
Dara
Salcedo
González
6. Datos del sinodal 4
M en C
Teresa María
Bosques
Tistler
7. Datos del trabajo escrito
Biomonitoreo de partículas magnéticas
en corteza de árboles de la Ciudad de Querétaro
55 p
2022

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, el Dr. Harald Norbert Böhnel, por su asesoría y apoyo durante la elaboración de este trabajo. A mis sinodales, la Dra. Dara Salcedo González, la Dra. Rosa Gabriela Castaño Meneses, el Dr. Manuel Miranda Anaya y la M. en C. Teresa María Bosques Tistler, por su retroalimentación y aporte para el enriquecimiento de mi tesis. En especial a la Dra. Dara por su apoyo con los trámites de titulación, a la Dra. Gaby por su ayuda con el análisis estadístico, al Dr. Manuel por permitirme realizar mi servicio social con él y a la M. en C. Tere por todos sus consejos y aliento durante los últimos años de mi formación.

Al M. en C. Erick Juárez Arriaga por su asesoría con el trabajo escrito y apoyo en la toma de mediciones.

Al M. en C. Adolfo Pacheco por su ayuda con la identificación de especies.

A Bertha y a Connie de la UMDI por su apoyo con los trámites escolares durante toda mi formación universitaria.

A mis profesores de la UMDI por sus enseñanzas y tiempo. Sobre todo, por haber creado un ambiente de aprendizaje tan cálido.

DEDICATORIA

A mis papás y a mi hermana por su amor, enseñanzas, paciencia y apoyo incondicional. En especial para mi mamá, la mujer más valiente y perseverante que conozco.

A Erick por su apoyo, comprensión y cariño, principalmente por motivarme durante la elaboración de este proyecto.

A Daisy por su compañía en todos mis desvelos y cariño durante más de media vida. A la pequeña Chila por traer alegría y risas a mis días.

A Jesús por su apoyo y buenas conversaciones durante mi formación universitaria.

A mi tía Caro, Jany y a Liz por su aliento para terminar este proyecto.

A Luis Alfredo por todas las conversaciones y consejos compartidos.

A Karen y a Yumma por su amistad durante todos estos años.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| AGRADECIMIENTOS..... | 3 |
| DEDICATORIA..... | 4 |
| RESUMEN..... | 7 |
| INTRODUCCIÓN..... | 8 |
| MARCO TEÓRICO..... | 10 |
| Contaminación del aire por material particulado..... | 10 |
| PM ₁₀ en el estado de Querétaro..... | 11 |
| PM _{2.5} en el estado de Querétaro..... | 12 |
| PM magnético..... | 13 |
| Riesgos a la salud asociados al PM..... | 14 |
| Magnetismo ambiental..... | 15 |
| Susceptibilidad magnética..... | 15 |
| Biomonitoreo magnético..... | 16 |
| Antecedentes de biomonitoreo magnético de PM..... | 17 |
| Antecedentes de biomonitoreo magnético <i>in situ</i> de PM..... | 18 |
| Antecedente de biomonitoreo magnético en Querétaro..... | 19 |
| Tráfico vehicular durante contingencia por COVID-19 en Querétaro..... | 20 |
| OBJETIVOS..... | 22 |
| Objetivo general..... | 22 |
| Objetivos particulares..... | 22 |
| METODOLOGÍA..... | 23 |
| Área de estudio..... | 23 |
| Parque Alameda Hidalgo..... | 24 |
| Biomonitoreo magnético..... | 25 |
| a) <i>Variación temporal de la k_{is} sobre la corteza de árboles</i> | 28 |
| b) <i>Variación de la k_{is} dependiendo de la orientación respecto al flujo vehicular</i> | 31 |
| c) <i>Variación altitudinal de la k_{is} en corteza de árboles</i> | 33 |
| Análisis estadístico..... | 33 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 35 |
| a) Variación temporal de la k_{is} | 35 |
| <i>Primera parte: estudio piloto (árbol T1)</i> | 35 |
| <i>Segunda parte (árboles T2-T9)</i> | 36 |

| | |
|---|-----------|
| Comportamiento de la k_{is} en relación con la precipitación y NMDE..... | 39 |
| k_{is} durante confinamiento por COVID-19 | 42 |
| b) Variación de la k_{is} respecto al flujo vehicular | 43 |
| c) Variación altitudinal de la k_{is} en corteza de árboles | 45 |
| d) Variación de la k_{is} en función de la distancia del árbol respecto a la calle..... | 47 |
| CONCLUSIONES..... | 50 |
| REFERENCIAS | 52 |

RESUMEN

Se llevó a cabo una primera aproximación al uso de una técnica reciente en magnetismo ambiental al realizar un biomonitoreo de partículas magnéticas acumuladas en la corteza de árboles del parque “Alameda Hidalgo” en la ciudad de Santiago de Querétaro, Qro., utilizando la susceptibilidad magnética *in situ* (k_{is}) como un proxy (indicador) de la concentración de estas partículas y, por tanto, de la contaminación del aire por material particulado magnético. Para obtener los datos de la k_{is} se utilizó un susceptibilímetro magnético portátil. Se monitoreó el comportamiento de la k_{is} durante dos periodos de tiempo: del 18 de enero al 18 de febrero de 2020 y del 8 al 20 de febrero de 2020, durante los cuales la k_{is} se mantuvo sin variaciones en todos los árboles estudiados y sin mostrar una disminución significativa posterior a precipitaciones $\leq 13 \frac{mm}{día}$. Se estudió también la variación de la k_{is} dependiendo de la posición de la corteza respecto al flujo vehicular; se observó que, en general, había una mayor k_{is} en la superficie del tronco que se encontraba en menor exposición a la corriente de aire generada por el flujo vehicular. Asimismo, se analizó la variación de la k_{is} a diferentes alturas sobre un mismo tronco, en donde no se encontró tendencia de una mayor k_{is} en altura alguna. También se hizo un breve análisis de los datos de la k_{is} antes (15 de marzo de 2020) y durante (8-9 de mayo de 2020) el confinamiento provocado por la pandemia de COVID-19 en donde no se observaron cambios significativos en la k_{is} entre ambas fechas. Se observó una mayor k_{is} a menor distancia del árbol a la calle y una disminución gradual de la k_{is} conforme los árboles se adentraban al parque; esto sugiere que los vehículos son la principal fuente de emisión de las partículas magnéticas, además de que a mayor distancia de la fuente de emisión menor será la k_{is} . Finalmente, se concluyó que no hay suficiente evidencia para saber si la k_{is} medida sobre la corteza de los árboles puede ser utilizada como un proxy de la contaminación por partículas magnéticas para analizar variaciones en el tiempo de estas, sin embargo, sí puede usarse para analizar la distribución espacial de las partículas. Esto podría ser útil para identificar zonas con mayor contaminación del aire por partículas magnéticas dentro de las ciudades, especialmente considerando el riesgo para la salud que representa este contaminante.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es un problema de salud pública al que se enfrenta actualmente la ciudad de Santiago de Querétaro. El material particulado (PM, por sus siglas en inglés) con contenido de metales, forma parte de la contaminación del aire, dentro de tal material, existe presencia de partículas con Fe, fuertemente magnéticas (Calderón-Garcidueñas *et al.*, 2019; Maher *et al.*, 2008). Estas partículas se asocian con efectos dañinos para la salud, al ser consideradas un factor de riesgo para enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como su posible asociación con enfermedades neurodegenerativas (Parkinson y Alzheimer), ya que han sido encontradas tanto en el cerebro como en el corazón de habitantes de ambientes contaminados (Maher *et al.*, 2008; Calderón-Garcidueñas *et al.*, 2019; Gonet & Maher, 2019).

De acuerdo con esto, y considerando que no todas las estaciones del Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire en Querétaro cuentan con la capacidad de medir estas partículas, o bien con datos suficientes para poder vigilar estos contaminantes, surge la necesidad de buscar alternativas de monitoreo (INECC, 2020). El biomonitoreo magnético es una opción sencilla, rápida, económica y no destructiva para evaluar el PM magnético utilizando colectores biológicos y técnicas de magnetismo ambiental (Chaparro *et al.*, 2020; Hofman *et al.*, 2017; Marié *et al.*, 2018).

Las propiedades magnéticas de los polvos atmosféricos pueden ser aprovechadas para el monitoreo de la calidad del aire, tal es el caso de la susceptibilidad magnética que ha sido utilizada como un proxy de contaminación en líquenes, plantas epífitas, hojas y corteza de árboles (Marie *et al.*, 2018; Castañeda Miranda *et al.*, 2016, 2020; Chaparro *et al.*, 2020). Asimismo, en diversos estudios se han utilizado colectores biológicos como hojas y corteza de árboles, líquenes y plantas epífitas para realizar biomonitores de la calidad del aire (Castañeda-Miranda *et al.*, 2016, 2017; Maher *et al.*, 2008; Kletetschka, 2011; Marie *et al.*, 2018). Estos pueden ser definidos como biomonitores acumulativos, ya que tienen la capacidad de almacenar contaminantes del aire y, así, ser utilizados para poder calcular la concentración de los mismos en el ambiente (Abas, 2021).

Con este estudio se pretende realizar una aproximación para el desarrollo de una técnica reciente en magnetismo ambiental, que consiste en el uso de la susceptibilidad magnética *in situ* sobre la corteza de árboles, como un proxy de la contaminación por PM magnético en la ciudad de Querétaro, donde esta técnica no se ha implementado. Para esto, el objetivo principal de este análisis consiste en evaluar si la susceptibilidad magnética *in situ* medida sobre la corteza de los árboles, puede ser utilizada como un proxy de la contaminación atmosférica por material particulado magnético en el parque Alameda Hidalgo de la ciudad de Querétaro.

Asimismo, las principales aportaciones del presente trabajo consisten en el uso de esta técnica para analizar la variación espacial de la susceptibilidad magnética *in situ* sobre la corteza de árboles a diferentes alturas y orientaciones sobre el tronco, así como a diferentes distancias respecto a la fuente de emisión de las partículas (vehículos), lo cual no ha sido estudiado hasta ahora. Además, este trabajo es el primer antecedente de biomonitorio magnético *in situ* en Querétaro, por lo que representa una primera aproximación al uso de esta técnica en esta ciudad.

MARCO TEÓRICO

Contaminación del aire por material particulado

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés), alrededor de 7 millones de personas en el mundo mueren cada año por la continua exposición a una mala calidad del aire, representando la contaminación atmosférica el mayor riesgo ambiental para la salud a nivel mundial (UNEP, 2016).

El material particulado (PM), definido como una suspensión en un gas de partículas finas sólidas o líquidas, forma parte de los contaminantes criterio, los cuales se caracterizan por ser sustancias liberadas a la atmósfera en grandes cantidades provenientes de diversas fuentes y que representan un riesgo para la salud (García-Reynoso *et al.*, 2007; Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2020). Puede ser emitido tanto por fuentes naturales como antropogénicas: dentro del primero se encuentran los incendios forestales, erupción de volcanes, resuspensión de polvo y brisa marina; como fuente antropogénica se tiene la combustión, emisiones de la industria y vehículos (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2020; EPA, 2021).

El tamaño de las partículas se relaciona con su fuente de emisión, así como con los efectos sobre la visibilidad, el clima y la salud (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2020). Se clasifican, de acuerdo con su diámetro, en material particulado inhalable menor a $10\ \mu m$ (PM_{10}) y en partículas finas inhalables menores a $2.5\ \mu m$ ($PM_{2.5}$) (EPA, 2021). Las partículas gruesas son aquellas $>2.5\ \mu m$ y su principal fuente de remoción de la atmósfera se debe a la precipitación, la deposición seca y la sedimentación (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2020).

Para el caso de la Ciudad de México, la principal fuente de emisión de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante 2016 fueron los vehículos, contribuyendo con el 52.5% y 55.7% de las emisiones totales respectivamente (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2018).

PM₁₀ en el estado de Querétaro

De acuerdo con el Informe Nacional de Calidad del Aire 2019 (INECC, 2020), para este año, en el estado de Querétaro, el PM₁₀ solo se midió en dos de las estaciones de monitoreo del Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA), ubicadas en los municipios de Santiago de Querétaro (capital del estado) y San Juan del Río, debido a que las cinco estaciones restantes, pertenecientes al SMCA que se encuentran en el estado de Querétaro, no contaban con el equipo de monitoreo para este contaminante. Los resultados del análisis realizado arrojaron que para ambos municipios se superó tanto el límite anual de concentración (40 µg/m³), como el límite de 24 horas (75 µg/m³) establecido por la NOM-025-SSA1-2014 (INECC, 2020; DOF, 2014). Para los dos anteriores, el municipio de Querétaro fue el que registró las mayores concentraciones, siendo de 184 µg/m³ para el límite de 24 horas y 67 µg/m³ para el límite anual (Figura 1).

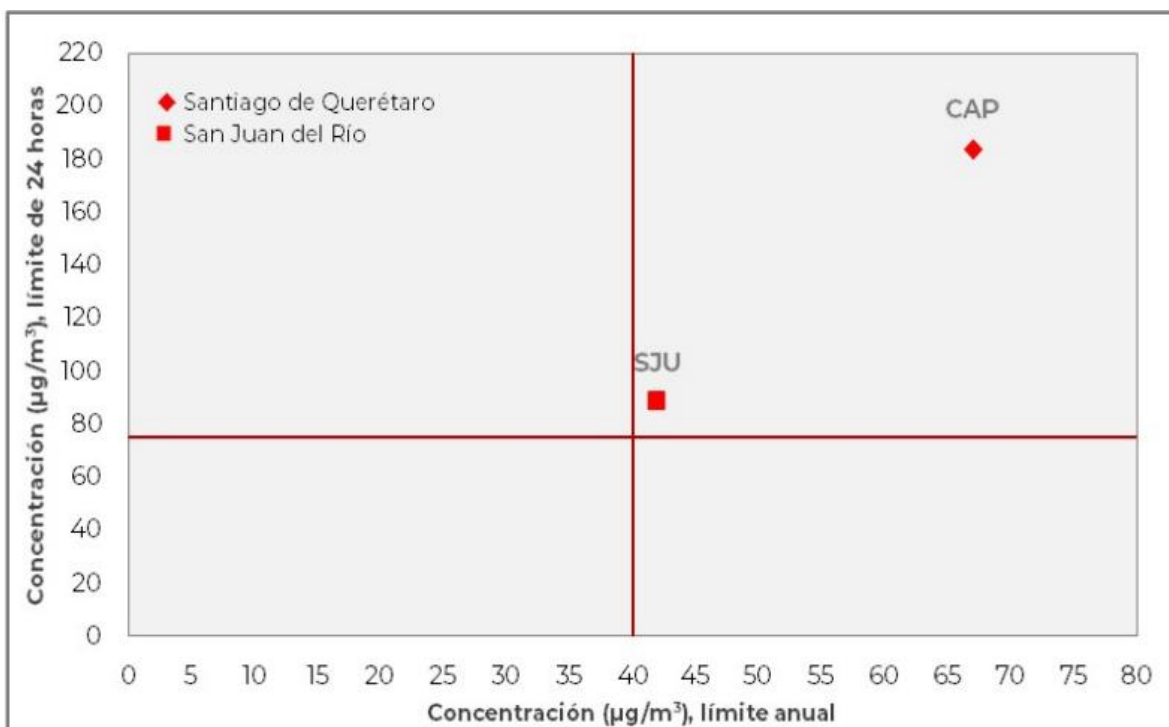


Figura 1: Concentración de PM₁₀ en estaciones de monitoreo de Santiago de Querétaro y San Juan del Río. La línea roja horizontal representa el límite de 24 horas (75 µg/m³) y la línea vertical el límite anual (40 µg/m³). Las siglas SJU corresponden a la estación de San Juan del Río y CAP hace referencia a la estación de la Delegación Carrillo Puerto dentro del municipio de Santiago de Querétaro (INECC, 2020).

Las mayores concentraciones de PM₁₀ en la capital queretana se registraron durante los meses de noviembre y diciembre, mientras que, para el municipio de San Juan del Río, éstas fueron durante abril y mayo (INECC, 2020).

PM_{2.5} en el estado de Querétaro

De las siete estaciones de monitoreo pertenecientes al SMCA en el estado de Querétaro durante 2019, solo cinco de ellas tenían la capacidad de medir el PM_{2.5} y, de éstas, solo fue posible analizar el cumplimiento de los límites establecidos por la NOM-025-SSA1-2014 en una de las estaciones de Santiago de Querétaro y en la estación de San Juan del Río debido a la insuficiencia de datos en el resto de las estaciones (INECC, 2020; DOF, 2014). En ambas se incumplieron los límites normados (Figura 2): para la ciudad de Querétaro en el límite anual (12 µg/m³) con 13 µg/m³ y para San Juan del Río en el límite anual con 17 µg/m³ y el límite diario (45 µg/m³) con 48 µg/m³ (INECC, 2020).

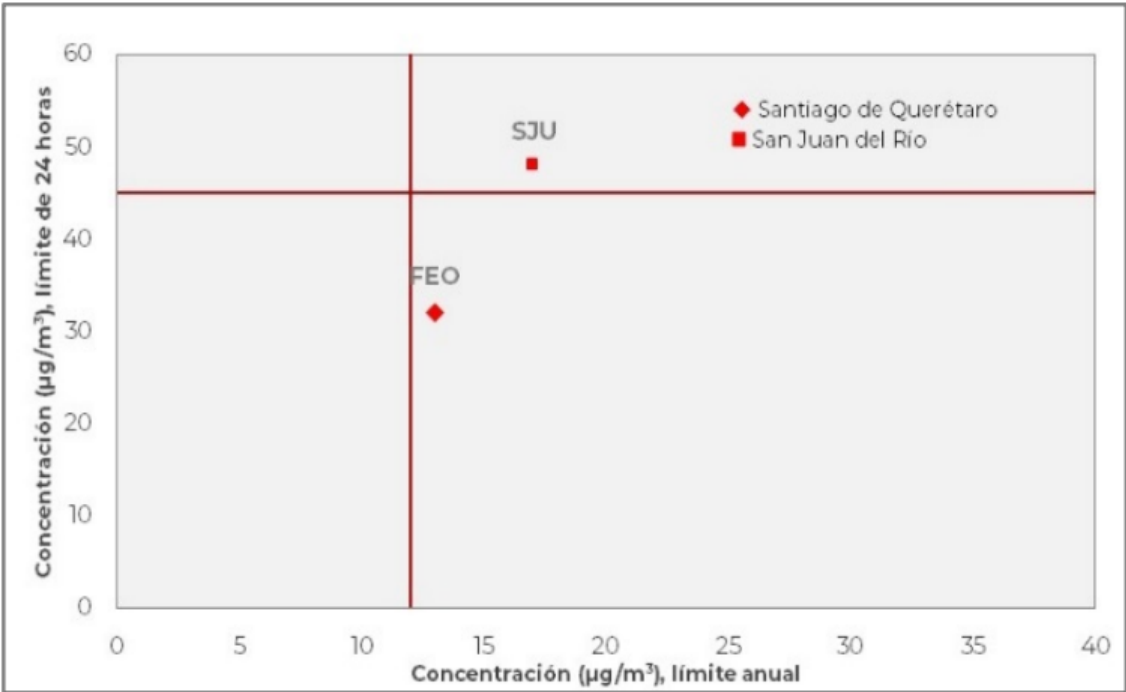


Figura 2: Concentración de PM_{2.5} en estaciones de monitoreo de Santiago de Querétaro y San Juan del Río. La línea roja horizontal representa el límite de 24 horas (45 µg/m³) y la línea vertical el límite anual (12 µg/m³). Las siglas SJU corresponden a la estación de San Juan del Río y FEO hace referencia a la estación Félix Osores dentro del municipio de Santiago de Querétaro (INECC, 2020).

Las mayores concentraciones de PM_{2.5} para el municipio de Querétaro se registraron durante los meses de julio y agosto y para San Juan del Río durante los meses de abril y mayo (INECC, 2020).

PM magnético

Como se ha mencionado anteriormente, parte del material particulado procede de fuentes antropogénicas. Para los fines de este estudio destacan las emisiones provenientes de corrosión metálica, motores de combustión, desgaste mecánico del sistema de frenos y llantas de autos, así como la abrasión de material de carretera, debido a que incluyen óxidos de hierro inhalables (Chaparro *et al.*, 2020). Las partículas con contenido de Fe son las de principal interés para este trabajo ya que, en la investigación realizada por Castañeda-Miranda *et al.* (2014) en la Ciudad de Querétaro, se observó que la principal carga magnética del PM se debía a titanomagnetita con bajo contenido de Ti, así como a una pequeña contribución de partículas de hematita, maghemita y goethita. Las partículas magnéticas con contenido de Fe derivadas de combustión y fricción representan el ~10% de las partículas ultrafinas < 0.1 μ m (Calderón-Garcidueñas *et al.*, 2019).

Se ha encontrado que las partículas magnéticas depositadas sobre las hojas de árboles se encuentran dentro de la clasificación de PM_{2.5} y están relacionadas a emisiones producidas por vehículos (Matzka & Maher, 1999; Castañeda-Miranda *et al.*, 2016; Maher *et al.*, 2008). En una investigación realizada con líquenes se encontraron partículas con contenido de Fe entre PM_{2.5} y PM_{1.0} (Marié *et al.*, 2018). En el estudio realizado con la especie de líquen *Parmotrema pilosum* (Stizenb.) como biomonitor, se encontraron partículas magnéticas de entre 0.1 y 5 μ m en los sitios con una mayor afluencia vehicular y presencia de industria metalúrgica, mientras que en los sitios menos contaminados y con menor tráfico vehicular se observó la presencia de partículas magnéticas < 0.1 μ m (Marié *et al.*, 2016).

En Querétaro se encontraron partículas de minerales tipo magnetita (Fe₃O₄), que se asociaron con emisiones provenientes de la industria y los vehículos, así como la presencia de óxidos de Fe junto con la presencia de metales tóxicos (Castañeda-Miranda *et al.*, 2014, 2020). El tamaño de grano de las partículas magnéticas, así como su concentración, varía

dependiendo de la ubicación en que se realice el monitoreo: en el centro de la ciudad de Querétaro se encontró una mayor contribución de partículas ricas en Fe asociadas a emisiones de los vehículos relacionadas a la combustión de motores, sistema de frenos y otros procesos vehiculares (Castañeda-Miranda *et al.*, 2014). Dentro de este estudio encontraron partículas con contenido de Fe de 38.7, 88, 90.2 y 97.7%wt.

Riesgos a la salud asociados al PM

Tanto el PM₁₀ como el PM_{2.5} tienen efectos negativos sobre la salud humana: se ha reportado que el PM₁₀ está relacionado con enfermedades pulmonares como la enfermedad pulmonar obstructiva crónica y el asma; el PM_{2.5} está relacionado con el desarrollo de enfermedades respiratorias crónicas e incremento en la mortalidad prematura (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2020).

La mortalidad global asociada a la exposición de PM_{2.5} aumentó de 3.5 millones en 1990 a 4.2 millones en 2015, representando para este año el 7.6% del total de muertes a nivel mundial (Cohen *et al.*, 2017). Asimismo, el PM relacionado al tráfico vehicular (partículas derivadas de la combustión, resuspensión de partículas de la carretera, desgaste de frenos y llantas), ha sido asociado con la mortalidad por causas cardiovasculares y respiratorias, así como con los ingresos hospitalarios diarios ligados a enfermedades cardiovasculares, insuficiencia cardíaca y accidente cerebrovascular, toxicidad cardiovascular, citotoxicidad e inflamación pulmonar (Hime *et al.*, 2018).

Aunado a esto, se ha reportado el potencial del PM magnético $< 0.1\mu m$ (nanopartículas) de causar daños severos a la salud debido a su capacidad para penetrar todos los órganos principales del cuerpo por inhalación y circulación sanguínea (Gonet & Maher, 2019). También se le asocia a efectos perjudiciales para la salud debido a su vínculo con enfermedades neurodegenerativas como el Parkinson y el Alzheimer, ya que se han encontrado estas partículas en el cerebro de habitantes de lugares con alta contaminación atmosférica, incluida la ciudad de México (Calderón-Garcidueñas *et al.*, 2019; Gonet & Maher, 2019).

Además, se han encontrado partículas metálicas en el sistema nervioso central, hígado e incluso en el fluido amniótico (Gonet & Maher, 2019). Esto resulta preocupante, ya que la exposición prenatal a PM se ha relacionado con bajo peso al nacer (Gonet & Maher, 2019).

Magnetismo ambiental

El magnetismo ambiental aplica técnicas del magnetismo de rocas al estudio de situaciones en las que el transporte y acumulación de minerales magnéticos dependen de las condiciones ambientales (Castañeda-Miranda, 2016). Estas técnicas han sido utilizadas para estimar la contaminación del aire por PM magnético ya que es una alternativa rápida, sencilla y económica para evaluar la distribución temporal y espacial de los contaminantes, además de ser no destructiva para los organismos colectores del PM (Chaparro *et al.*, 2020). Para realizar estas evaluaciones se ha utilizado la susceptibilidad magnética como proxy de la contaminación por PM magnético ya que se ha encontrado una correlación significativa entre esta y la concentración de PM (Castañeda-Miranda *et al.*, 2020).

Susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética (k) está dada por la magnetización por unidad de volumen (M) que adquiere un material al estar situado en un campo magnético uniforme (H),

$$k = \frac{M}{H}$$

Donde la k es adimensional.

La susceptibilidad de masa o susceptibilidad magnética específica (X) se obtiene de dividir la k entre la densidad (ρ),

$$X = \frac{k}{\rho}$$

(Evans & Heller, 2003)

La k representa la “facilidad con que un material se magnetiza” como respuesta general de los granos o minerales magnéticos presentes, lo cual depende de la concentración, forma y tamaño de estos granos (Castañeda-Miranda, 2016).

Biomonitoreo magnético

Considerando que el PM tiene consecuencias negativas para la salud humana y que existen déficits en el SMCA, es necesario encontrar alternativas de monitoreo que sean rápidas, sencillas y económicas. El biomonitoreo magnético cumple con estas características, además de ser una técnica no destructiva para los organismos que fungen como colectores biológicos. Asimismo, proporciona información cualitativa de la concentración magnética de PM, mineralogía y tamaño de grano (Hofman *et al.*, 2017).

Las técnicas de magnetismo ambiental resultan útiles para el monitoreo de la contaminación del aire debido a que se ha encontrado una buena correlación entre la concentración total de partículas suspendidas y la susceptibilidad magnética (k), por lo que la k permite detectar fácilmente áreas con altos niveles de contaminación de manera rápida, económica y eficiente (Castañeda-Miranda A. *et al.*, 2014). Asimismo, el PM contiene concentraciones de minerales magnéticos fácilmente medibles (Hofman *et al.*, 2017). Aunado a esto, ha sido comprobado que los parámetros magnéticos pueden ser utilizados como un proxy de la contaminación, debido a que las concentraciones magnéticas presentan una fuerte relación con el PM magnético (Castañeda-Miranda A. *et al.*, 2016; Hofman *et al.*, 2017; Maher *et al.*, 2008; Marié *et al.*, 2018; Mitchell & Maher, 2009).

Los colectores biológicos como hojas de árboles, corteza, líquenes, musgos y plantas epífitas acumulan sobre su superficie PM magnético al encontrarse expuestos a la contaminación del aire, por lo que resultan útiles para la obtención de información de la calidad del aire en diferentes ubicaciones y tiempo (Hofman *et al.*, 2017). La variabilidad temporal, así como la velocidad con que se depositan estas partículas sobre colectores biológicos como las hojas de los árboles, depende del clima y condiciones atmosféricas locales, así como de las fuentes de emisión, por lo que es importante que éstas sean consideradas durante el biomonitoreo (Castañeda-Miranda *et al.*, 2017, 2020). Un ejemplo de esto son los resultados obtenidos por Marié *et al.* (2018) quienes observaron una relación inversa entre la k_{is} medida sobre líquenes en Argentina y la temperatura ya que registraron valores más bajos de k_{is} durante los periodos de mayor temperatura debido a que tienden a tener una

altura de mezcla atmosférica más alta. Asimismo, Marié *et al.* (2018) y Castañeda-Miranda *et al.* (2020) encontraron que la precipitación provocaba una disminución en los valores magnéticos en líquenes y hojas de árboles respectivamente.

Resolución espacial y temporal del biomonitoreo magnético

Además, el biomonitoreo magnético tiene la ventaja de brindar una resolución espacial y temporal del PM magnético a diferentes escalas. Espacialmente se han realizado estudios para analizar la distribución y concentración de partículas magnéticas desde escalas de $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ dentro del talo de líquenes (Marié *et al.*, 2018), hasta escalas de varios kilómetros en ciudades como Querétaro, México utilizando hojas de árboles como colectores biológicos (Castañeda-Miranda *et al.*, 2017); Tandil, Argentina usando líquenes (Marié *et al.*, 2016) y Mar de la Plata, Argentina con corteza de árboles (Chaparro *et al.*, 2020), con lo que se han creado mapas de contorno de los parámetros magnéticos como proxy de la contaminación del aire en estas ciudades. Temporalmente se han registrado los cambios en los parámetros magnéticos desde análisis diarios, semanales y hasta 16 meses, permitiendo observar los cambios estacionales durante el año en estos parámetros (Castañeda-Miranda *et al.*, 2020; Marié *et al.*, 2018).

Antecedentes de biomonitoreo magnético de PM

Se han realizado varias investigaciones en torno a la presencia de PM magnético utilizando técnicas magnéticas y colectores biológicos como corteza (Chaparro *et al.*, 2020; Kletetschka, 2011), follaje (Castañeda-Miranda *et al.*, 2014, 2017, 2020; Matzka & Maher, 1999; Maher *et al.*, 2008; Mitchell & Maher, 2009; Muhammad *et al.*, 2019) plantas epífitas (Castañeda-Miranda *et al.*, 2016), suelo (Kletetschka, 2011) y líquenes (Marié *et al.*, 2016; 2018). Dentro de estos estudios destacan los realizados por Chaparro *et al.* (2020) y Kletetschka (2011) utilizando corteza de árboles, así como la investigación con líquenes desarrollada por Marié *et al.* (2018). Lo anterior debido a que son los únicos estudios en donde se ha llevado a cabo un biomonitoreo magnético *in situ* utilizando la k_{is} como proxy de contaminación por PM magnético, el cual tiene la ventaja de permitir realizar las

mediciones en campo durante diferentes periodos de tiempo, preservar al organismo en su hábitat sin destruirlo, además de la rápida obtención de resultados (Chaparro *et al.*, 2020). En la siguiente sección se abordarán a detalle estos estudios.

Antecedentes de biomonitoreo magnético *in situ* de PM

Marié *et al.* (2018) monitorearon semanalmente la k_{is} en el talo de 7 líquenes distribuidos en la ciudad de Tandil, Argentina durante 16 meses. Para realizar las mediciones de k_{is} utilizaron un susceptibilímetro magnético MS3 (Bartington Instruments Ltd) conectado a un sensor que les permitió realizar mediciones con una resolución de $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ en una cuadrícula para cada liquen. Con esta información generaron mapas de contorno para observar la concentración del PM magnético acumulado dentro de cada liquen. Los valores promedio de k_{is} encontrados en los líquenes analizados variaron entre $4.1 - 23.9 \times 10^{-5} SI$. Adicionalmente, encontraron PM conformado por Fe, para el $PM_{2.5}$ observaron un contenido de Fe entre $13 - 88\%wt$ y para el $PM_{1.0}$ de entre $35 - 92\%wt$ asociado a emisiones de vehículos e industria metalúrgica. Asimismo, el haber monitoreado durante 16 meses les permitió observar el comportamiento temporal de la k_{is} , para lo cual encontraron que la precipitación generaba una disminución en la k_{is} y observaron una relación inversa entre los periodos de alta temperatura con una baja k_{is} .

Respecto al uso de corteza de árbol para realizar biomonitoreos magnéticos *in situ* de la contaminación del aire, existen dos antecedentes en los que se utilizó la k_{is} como proxy de contaminación por PM magnético. El primero de ellos publicado por Kletetschka (2011) en donde midió la k_{is} sobre la corteza de un arce rojo ubicado en el bosque que atraviesa la autopista Washington-Baltimore. Kletetschka (2011) utilizó un susceptibilímetro magnético portátil SM20 (Geofyzika a.s.) para realizar ocho mediciones de k_{is} sobre la circunferencia del tronco, a los 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° y 315° respecto al norte, en donde encontró un patrón asimétrico en el compartimiento de la k_{is} , con valores menores en la superficie del tronco que se encontraba frente a la carretera y valores mayores en la cara opuesta. Este comportamiento fue explicado mediante un modelo de circulación del aire, en donde Kletetschka (2011) argumentó que la corriente de aire generada por el flujo

vehicular generaba una disminución en la humedad de la superficie del tronco orientada hacia la carretera por lo que su potencial para capturar partículas disminuía respecto a la superficie del tronco protegida de la corriente de aire.

El segundo y más reciente antecedente respecto al uso de corteza como colector biológico de PM magnético fue realizado por Chaparro *et al.* (2020), quienes utilizaron la k_{is} como proxy de contaminación en un estudio realizado en un área de 10.7 km^2 en Mar de la Plata, Argentina. Mediante el uso de k_{is} encontraron que el contenido de PM magnético variaba dentro del área de estudio, con valores de k_{is} entre $0.2 - 20.2 \times 10^{-5} SI$, los cuales fueron utilizados para crear mapas de predicción de contaminación por PM magnético. A través de estos observaron que las zonas con mayor k_{is} ($> 8 \times 10^{-5} SI$) correspondían a las áreas de mayor densidad poblacional y con los mayores registros de tráfico vehicular (19-64 vehículos/min), mientras que las zonas con los menores valores de k_{is} ($< 4 \times 10^{-5} SI$) se caracterizaban por tener menor tráfico vehicular (4-14 vehículos/min) y mayor densidad de árboles en las calles. Aunado a esto, determinaron que las partículas magnéticas observadas eran ricas en Fe, con contenidos de Fe entre $20 - 91\%wt$ cuya fuente de emisión se debía al tráfico vehicular. Además, encontraron que estas partículas tenían tamaños $< 0.1 - 1 \mu m$ y alojaban elementos potencialmente peligrosos para la salud humana como Ba, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, V, Zn, Al, Si, Ca, Ti, and Ce.

Antecedente de biomonitoreo magnético en Querétaro

En la ciudad de Querétaro se realizó un biomonitoreo magnético de PM utilizando hojas de ficus (*Ficus benjamina*) como colectores biológicos, y a través de mediciones de susceptibilidad magnética específica (X) se determinó que después de una lluvia $> 3mm$ se necesitaba de 15 días para que las hojas llegaran a un equilibrio dinámico, es decir, que el depósito de partículas sobre las hojas y la pérdida de estas se equilibrara (Castañeda-Miranda *et al.*, 2020; Castañeda-Miranda, 2016). En el mismo estudio se concluyó que los valores de la X de las hojas podían ser utilizados como una aproximación de la calidad del aire (Castañeda-Miranda *et al.*, 2020).

Tráfico vehicular durante contingencia por COVID-19 en Querétaro

Al igual que en el resto del país, en la capital queretana el confinamiento debido a la pandemia por el virus SARS-COV-2 comenzó oficialmente el 23 de marzo de 2020 con la *Jornada Nacional de Sana Distancia* (Enciso, 2020). Ello provocó una reducción en la movilidad ciudadana que continuó hasta principios del mes de junio del mismo año, cuando comenzaron a reanudarse algunas actividades económicas en Querétaro (Estrella, 2020).

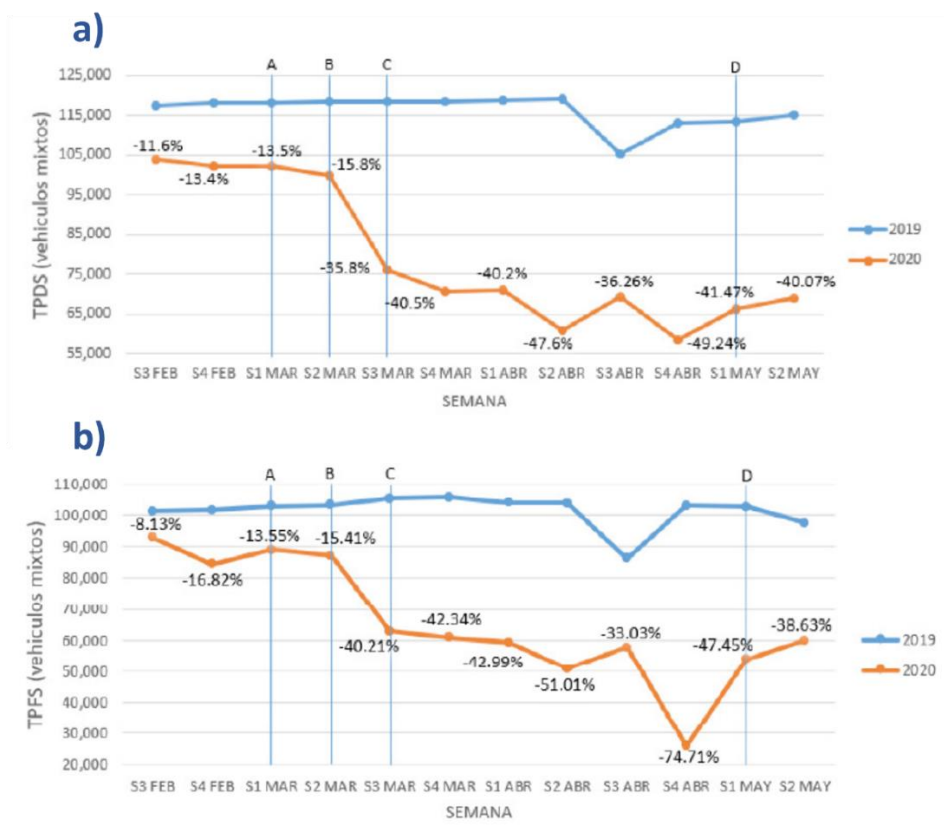


Figura 3: a) Tránsito Promedio Diario Semanal y b) Tránsito Promedio de Fin de semana del municipio de Querétaro. Datos comparativos entre el tráfico vehicular de 2020 respecto al de 2019. La línea A (28 de febrero 2020) representa la fecha del primer caso de COVID-19 en México; la línea B (11 de marzo) primer caso de COVID-19 en Querétaro; línea C (17 de marzo) suspensión de actividades escolares en Querétaro y la línea D (2 de mayo) representa la fecha de reforzamiento de medidas de contingencia en Querétaro (Secretaría de Movilidad del Municipio de Querétaro en Obregón et al., 2020).

Esta reducción en la movilidad se vio reflejada en una disminución del 23.28% en el tráfico vehicular a partir de la suspensión de las actividades escolares en el estado (17 de marzo de

2020), tomando como referencia la tercera semana de febrero cuando todavía no se habían detectado casos de COVID-19 en México (Obregón *et al.*, 2020).

Asimismo, en la información presentada por la Secretaría de Movilidad del Municipio de Querétaro (Obregón *et al.*, 2020), se expuso el Tránsito Promedio Diario Semanal (TPDS) y el Tránsito Promedio de Fin de Semana (TPFS) de 2020 comparándolo con el de 2019 (Figura 3). En éste se observó que durante el 2020 el tráfico vehicular fue menor al de 2019 a partir del 17 de marzo de 2020 cuando comenzó la suspensión de actividades académicas presenciales en el estado de Querétaro. Se observaron diferencias de hasta 49% para el TPDS y 75% para el TPFS respecto al 2019 entre los meses de marzo y mayo.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar si la susceptibilidad magnética *in situ* medida sobre la corteza de los árboles puede ser utilizada como un proxy de la contaminación atmosférica por material particulado magnético en el parque Alameda Hidalgo de la ciudad de Querétaro.

Objetivos particulares

- a) Analizar el comportamiento respecto al tiempo de la susceptibilidad magnética *in situ* sobre la corteza de los árboles.
- b) Analizar la variación altitudinal de la susceptibilidad magnética *in situ* sobre la corteza de los árboles medida a diferentes alturas del tronco.
- c) Analizar la variación de la susceptibilidad magnética *in situ* de la corteza de los árboles en la circunferencia del tronco a una misma altura dependiendo de su orientación respecto al flujo vehicular.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el municipio de Santiago de Querétaro, capital del estado de Querétaro, México (Figura 4), cuya superficie es de 682.7 km², equivalente al 5.8% del territorio estatal (INEGI, 2021). En 2020 la población del municipio de Querétaro era de 1,049,777 habitantes, correspondiente al 44.3% de la población total del estado (INEGI, 2021). La temperatura media anual del municipio es de 18.7 °C y su precipitación media anual de 554.6 mm (INEGI, 2017).



Figura 4: Área urbana del municipio de Querétaro. De arriba hacia abajo en el primer mapa se observa la ubicación del estado de Querétaro dentro de México; en la segunda imagen se presenta la ubicación del municipio de Santiago de Querétaro dentro del estado de Querétaro y en la última imagen se muestra resaltada el área urbana del municipio de Santiago de Querétaro. Modificado de Hernández-Guerrero (2015).

El municipio de Querétaro se ha caracterizado por ser una ciudad en expansión poblacional con flujo migratorio de las entidades vecinas debido a que cuenta con mejores características que estas en materia de seguridad, calidad de vida y empleo (Ochoa-Ramírez et al., 2019). Aunado a esto, el desarrollo y la planeación de la ciudad han sido dominados por el uso de automóviles, lo cual ha dado como resultado una expansión urbana de baja densidad (Municipio de Querétaro, 2016). En 1980 la población de la ciudad era de 324 mil habitantes, con una densidad de 444 habitantes/ha, mientras que en 2016 la población aumentó a 880 mil habitantes, pero la densidad disminuyó a tan solo 85 habitantes/ha; en ese mismo año se registró un total de 1.6 millones de desplazamientos al día, de los cuales el 44% se realizaron en automóviles y el 33% en transporte público (Municipio de Querétaro, 2016). Esto ha dado como resultado que el tiempo promedio de viaje de las personas sea de 52 minutos en transporte público y 34 minutos usando automóviles, mientras que para el tiempo de caminata se registró un promedio de 18 minutos por viaje (Municipio de Querétaro, 2016).

Parque Alameda Hidalgo

El área específica de estudio fue el parque “Alameda Hidalgo” y sus calles circundantes (Figura 5). Este parque se caracteriza por estar ubicado en el Centro Histórico de la ciudad, rodeado por cuatro avenidas principales con un constante flujo de vehículos privados y transporte público. Colinda al NW con Av. Zaragoza, NE con Av. Pasteur, al SE con Av. Constituyentes y al SW con Av. Corregidora.

La Alameda Hidalgo tiene una antigüedad mayor a 200 años y cuenta con más de 1,600 árboles distribuidos en sus 9 ha (Presidencia Municipal de Querétaro, 2018). A su vez, se subdivide en 24 jardines interiores, que representan el 60% de la superficie del parque y se encuentran separados entre ellos por andadores y espacios de recreación como: zona de juegos infantiles, pista de patinaje, fuente, quiosco y explanada central (González Sosa & Guevara Escobar, 2007). El parque es utilizado principalmente como área de recreación para niños, familias y personas ejercitándose sobre sus andadores. Antes de la pandemia el

parque también se utilizaba para realizar conciertos en su explanada central. Es importante mencionar que durante los primeros meses de la contingencia en México por la pandemia de SARS-COV-2 el parque mantuvo sus puertas cerradas al público.



Figura 5: Área de estudio (Parque Alameda Hidalgo, Santiago de Querétaro, Qro.)
Imagen: Google Earth

Dentro de la Alameda Hidalgo se ha registrado la presencia de diferentes especies de árboles, entre ellas: *Pinus spp.*, *Ficus benjamina* L., *Jacaranda mimosifolia* D. Don, *Fraxinus excelsior* L., *Punica granatum* L., *Persea americana* Mill. y *Taxodium mucronatum* Ten. (González Sosa & Guevara Escobar, 2007). Asimismo, en las banquetas y camellones que rodean el parque se pueden encontrar especies arbóreas como *Ficus benjamina* L., *Fraxinus* sp. y *Casuarina cunninghamiana*.

Biomonitoreo magnético

Se realizó un biomonitoreo de partículas magnéticas acumuladas en la corteza de árboles utilizando la susceptibilidad magnética *in situ* (k_{is}) como un proxy de la concentración de estas partículas y, por tanto, de la contaminación del aire por material particulado magnético. Para realizar las mediciones de k_{is} se seleccionaron árboles de la Alameda Hidalgo y sus calles circundantes, utilizando la corteza como colector biológico y un

susceptibilímetro magnético portátil SM-30 (ZH instruments) con una sensibilidad de 1×10^{-7} SI (Figura 6a).

Este instrumento está diseñado para poder realizar mediciones de susceptibilidad magnética en campo. Tiene un oscilador con una bobina de captación como sensor, el cual mide la frecuencia de oscilación al colocar la bobina sobre la superficie del material y al retirar el aparato de la superficie (ZH instruments, 2016). Dado que, el cambio en la frecuencia de oscilación es proporcional a la susceptibilidad del objeto medido, después de realizar estas dos mediciones (sobre la superficie y otra medición al aire), se restan ambos valores para mostrar la k (ZH Instruments, 2008). La bobina, de 50 *mm* de diámetro, está ubicada en la parte inferior del aparato y ayuda a obtener la k de los primeros 2 *cm* de la superficie lo cual permite lecturas en áreas irregulares; su valor máximo de medición es de 1 *SI* y trabaja a temperaturas de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ZH Instruments, 2008; 2016). Este susceptibilímetro magnético tiene seis formas o modos diferentes de realizar las mediciones, para el caso de este trabajo se utilizó el modo de interpolación debido a su capacidad de medir bajas k (ZH Instruments, 2008). La forma de operar de este modo consiste en realizar un protocolo de medición de tres pasos, primero una medición al aire, posteriormente una medición sobre la corteza (Figura 6e) y finalmente otra medición al aire. De esta manera el SM-30 compara la deriva térmica del aparato y los valores de susceptibilidad para finalmente mostrar el valor de la k_{is} corregido (ZH Instruments, 2008).

Para la selección de árboles a medir se consideró que los troncos de éstos no fueran mojados por los aspersores de riego (Figura 6b) y se encontraran en el perímetro de los jardines (de esta manera se descartaron la mayoría los árboles cuyo tronco era afectado por los aspersores). Asimismo, se buscó que la corteza de los árboles no estuviera erosionada (Figura 6d), sus ramas iniciaran por arriba de 1.5 *m* de altura y su tronco fuera recto con pocas irregularidades sobre la superficie a medir (Figura 6c), de tal manera que permitiera colocar directamente sobre la corteza el SM-30 (Figura 6g) y así evitar tener un espacio vacío entre ambos afectando las mediciones.



Figura 6: Fotos representativas de la metodología seguida: a) SM-30; b) tronco de árbol mojado por aspersores de riego; c) tronco recto; d) corteza de árbol erosionada por factor antropogénico; e) toma de medición de k_{is} sobre la corteza; f) banqueta de Av. Corregidora al lado del parque Alameda y flujo vehicular; g) SM-30 colocado directamente sobre el tronco sin dejar espacio vacío entre el aparato y la corteza.

Para esta tesis se realizaron tres pruebas diferentes:

- a) Análisis de la **variación temporal de la k_{is}** sobre la corteza de árboles.
- b) Evaluación de la variación de la k_{is} sobre la corteza alrededor de la circunferencia del tronco dependiendo de su **posición respecto al flujo vehicular** (comparando entre la superficie del tronco que estaba directamente expuesta a la calle y la superficie opuesta, es decir, la menos expuesta al flujo vehicular).
- c) Análisis de la **variación de la k_{is} sobre la corteza a diferentes alturas** sobre el tronco.

En la Figura 7 se presenta el esquema de las tres pruebas realizadas para esta tesis, las cuales serán descritas a continuación.

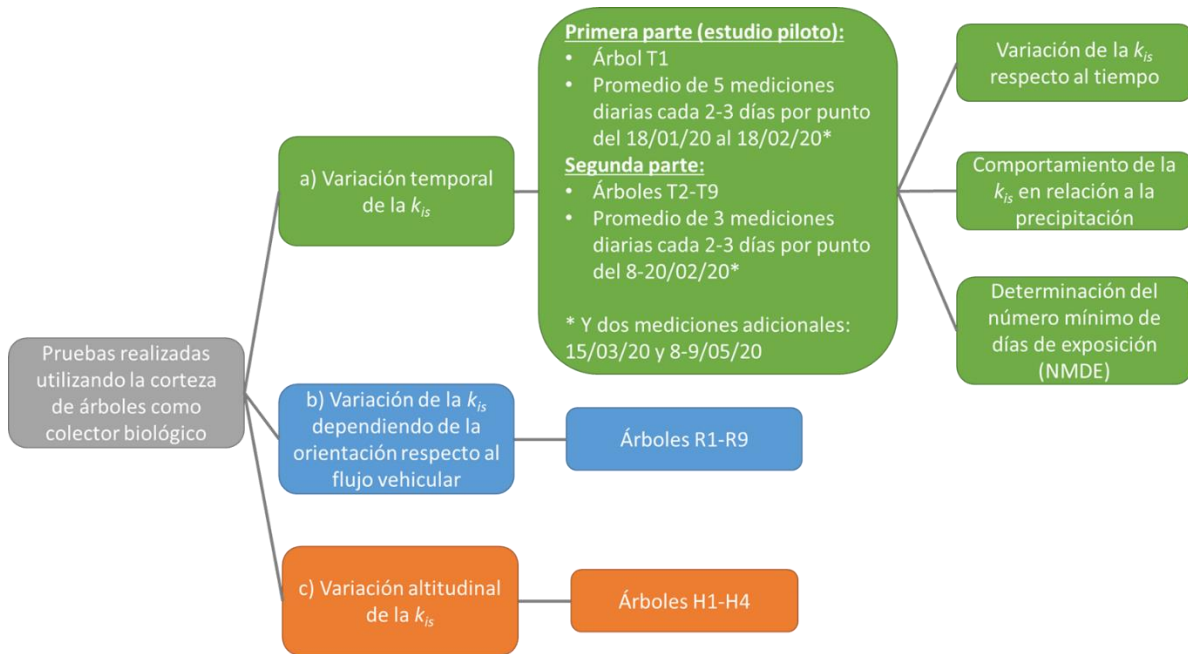


Figura 7: Esquema de las pruebas realizadas en este estudio utilizando la corteza de árboles como colector biológico.

a) Variación temporal de la k_{is} sobre la corteza de árboles

En la Figura 7 en color verde se muestra la descripción esquematizada de esta prueba. Con esta se buscó atender tres cuestionamientos principales:

- Cómo era la variación de la k_{is} sobre la corteza de los árboles seleccionados respecto al tiempo (creciente, decreciente o sin diferencias significativas).
- Comportamiento de la k_{is} en relación con la precipitación.
- Determinar el número mínimo de días de exposición (NMDE) necesarios para que la k_{is} en la corteza llegara a un valor estable después de una precipitación que generara un lavado de partículas.

Para responder lo anterior se seleccionaron e identificaron por especie (Tabla 1) siete árboles distribuidos dentro del parque (T1, T3, T4, T5, T6, T7 y T8) y dos al lado del parque sobre Av. Pasteur (T2 y T9), cuya ubicación puede ser apreciada en la Figura 8. Se procuró

que estos árboles cumplieran con las características antes mencionadas: tronco recto, no afectados por aspersiones, corteza no erosionada y ramas por encima de los 1.5 m. En cada árbol se realizaron mediciones de k_{is} sobre la circunferencia del tronco a una altura de 1.5 m (debido a que la altura promedio del mexicano está entre 1.58 y 1.64 m, por lo que se consideró que la altura promedio a la que respiran los mexicanos sería a los ~ 1.5 m; IMCO, 2016) durante varias semanas, con el fin de analizar si existían variaciones temporales en la k_{is} . Para asegurar que todas las mediciones se realizaran sobre las mismas superficies éstas fueron delimitadas dibujando su perímetro con gis sobre la corteza. De esta manera, el área medida fue fácil de identificar durante el periodo en que se realizaron las mediciones.

Tabla 1: Especies de árboles seleccionados para analizar la variación temporal (T1-T9), variación respecto al flujo vehicular (R1-R9) y variación altitudinal de la k_{is} en la corteza de árboles.

| Árbol | Especie |
|--|--|
| T1, T2, T4, T5, T6 y T9 | Pino australiano (<i>Casuarina cunninghamiana</i>) |
| T3 R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8 y R9 H1, H2, H3 y H4 | Fresno (<i>Fraxinus</i> sp.) |
| T7 y T8 | Roble australiano (<i>Grevillea robusta</i>) |

Esta prueba se llevó a cabo en dos partes: la primera comenzando con un estudio piloto en el que se realizaron mediciones de k_{is} del 18 enero al 18 de febrero de 2020 únicamente con el árbol T1 a fin de observar cuáles eran las características ideales para la toma de mediciones en cuanto a la selección de árboles y áreas a medir sobre la corteza. La segunda parte se llevó a cabo del 8 al 20 de febrero de 2020 con las mediciones en el resto de los árboles (T2 al T9) tomando en consideración los aprendizajes obtenidos durante los primeros días del estudio piloto a fin de tener mediciones más precisas. Para ambas partes las mediciones fueron tomadas cada dos o tres días realizando un total de 12 tomas para la primera parte y 6 para la segunda durante los periodos medidos. Adicionalmente, se

realizaron 2 mediciones en todos los árboles para analizar la variación de la k_{is} antes y durante el confinamiento debido a la pandemia por COVID-19, 15 de marzo y, 8 y 9 de mayo de 2020 respectivamente (el 8 de mayo para los árboles T2 y T9, y 9 de mayo para el resto de los árboles).

Para el árbol T1 se seleccionaron 8 puntos a medir a una altura de 1.5 m identificados por su orientación como N, NE, E, SE, S, SW, W y NW. Se utilizó el promedio de 5 mediciones realizadas durante el mismo momento como el valor representativo de la k_{is} para cada punto por día y se utilizó la desviación estándar como la medida del error. En los árboles T2-T9 la k_{is} se midió también a 1.5 m de altura en las orientaciones N, E, S y W (excepto para el árbol T2 para el que solo se midió en el E y W debido a lo delgado de su tronco), realizando 3 repeticiones diarias de las mediciones para utilizar su promedio como el valor representativo de la k_{is} para cada punto y la desviación estándar de estos datos como la medida del error.

Para el análisis de esta prueba se consideró cada punto medido sobre la corteza y cada árbol como independiente, ya que se buscaba ver si existía una tendencia general de la k_{is} a aumentar, disminuir o mantenerse sin cambios significativos conforme aumentaba el tiempo. Debido a esto, no hubo una homogeneización en la selección de especies de árboles estudiados. Asimismo, para la selección de estas especies se tomó en consideración lo concluido por Castañeda-Miranda *et al.* (2020) quienes mencionan que es importante analizar la capacidad de las especies seleccionadas de actuar como un biomonitor y no solamente elegir la especie más abundante en la zona. Es por esto por lo que, las especies seleccionadas tanto para esta prueba como para las siguientes se enfocó principalmente en que su corteza fuera rugosa y no estuviera desgastada por acción antropogénica, así como que contara con un tronco recto para poder realizar las mediciones y colocar correctamente el SM-30 sobre este.

Durante los periodos de medición se registraron algunos días con lluvia, por lo que, para analizar la variación de la k_{is} en relación con la lluvia (observar si disminuía la k_{is} posiblemente por un lavado de partículas), se utilizaron los datos registrados por la

Comisión Estatal de Aguas de Querétaro (CEA) en su reporte de precipitación de la estación de monitoreo en las oficinas centrales de la CEA durante los meses de enero y febrero.

Considerando la información derivada del análisis de la variación temporal de la k_{is} y su relación respecto a la precipitación, se buscó obtener el número mínimo de días de exposición (NMDE) necesarios para realizar mediciones de k_{is} sobre la corteza de árboles después de una precipitación. Es decir, la cantidad de días, después de una precipitación que provocara el lavado de las partículas sobre la corteza, que tendrían que transcurrir para que la k_{is} llegara a un valor estable (que no disminuyera o aumentara significativamente con el paso del tiempo), representando así que la corteza había llegado a un equilibrio entre pérdida y ganancia de partículas y/o que había llegado a su máximo punto de saturación.

b) Variación de la k_{is} dependiendo de la orientación respecto al flujo vehicular

Para analizar la variación de la k_{is} sobre la corteza dependiendo de la orientación respecto al flujo vehicular (representada en color azul dentro del esquema de pruebas en la Figura 7), se seleccionaron 9 fresnos *Fraxinus* sp. (R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8 y R9 en Figura 8 y Tabla 1) ubicados en la banqueta de la Alameda sobre Av. Corregidora (Figura 6f). Para su selección se consideraron todas las características necesarias para realizar las mediciones observadas durante el análisis de variación temporal. Esta especie fue seleccionada tanto para esta prueba como para el análisis de la variación a diferentes alturas, debido a que durante la primera prueba se observó que cumplía bastante bien con las características ideales para las mediciones al tener un tronco recto y corteza agrietada que permitía la acumulación de partículas, además de que la mayoría de los árboles situados sobre la banqueta del parque de Av. Corregidora pertenecían a esta especie, por lo que resultaba favorable para realizar las mediciones de orientación y altura.

En cada árbol se midió la k_{is} a una altura de 1.5 m en dos superficies de 25x25 cm aproximadamente: una sobre la cara del tronco que estaba directamente expuesta al flujo vehicular (viendo hacia la calle) y la otra sobre la cara opuesta, es decir, la que se encontraba viendo hacia el parque y, por tanto, se encontraba más protegida de las corrientes de aire generadas por el flujo vehicular. Para la obtención del valor representativo de la k_{is} en cada

Para cada cara se utilizó el promedio de 5 mediciones de k_{is} distribuidas sobre el área de $25 \times 25 \text{ cm}$ y se usó a la desviación estándar como la medida del error.

Todos los árboles seleccionados para esta prueba (R1-R9) fueron seleccionados de la misma especie para poder homogeneizar las condiciones entre estos. Además, se procuró que la corteza fuera lo más parecida posible entre ambas superficies de un mismo árbol con la finalidad de poder comparar la diferencia de k_{is} dependiendo de la posición de la cara.

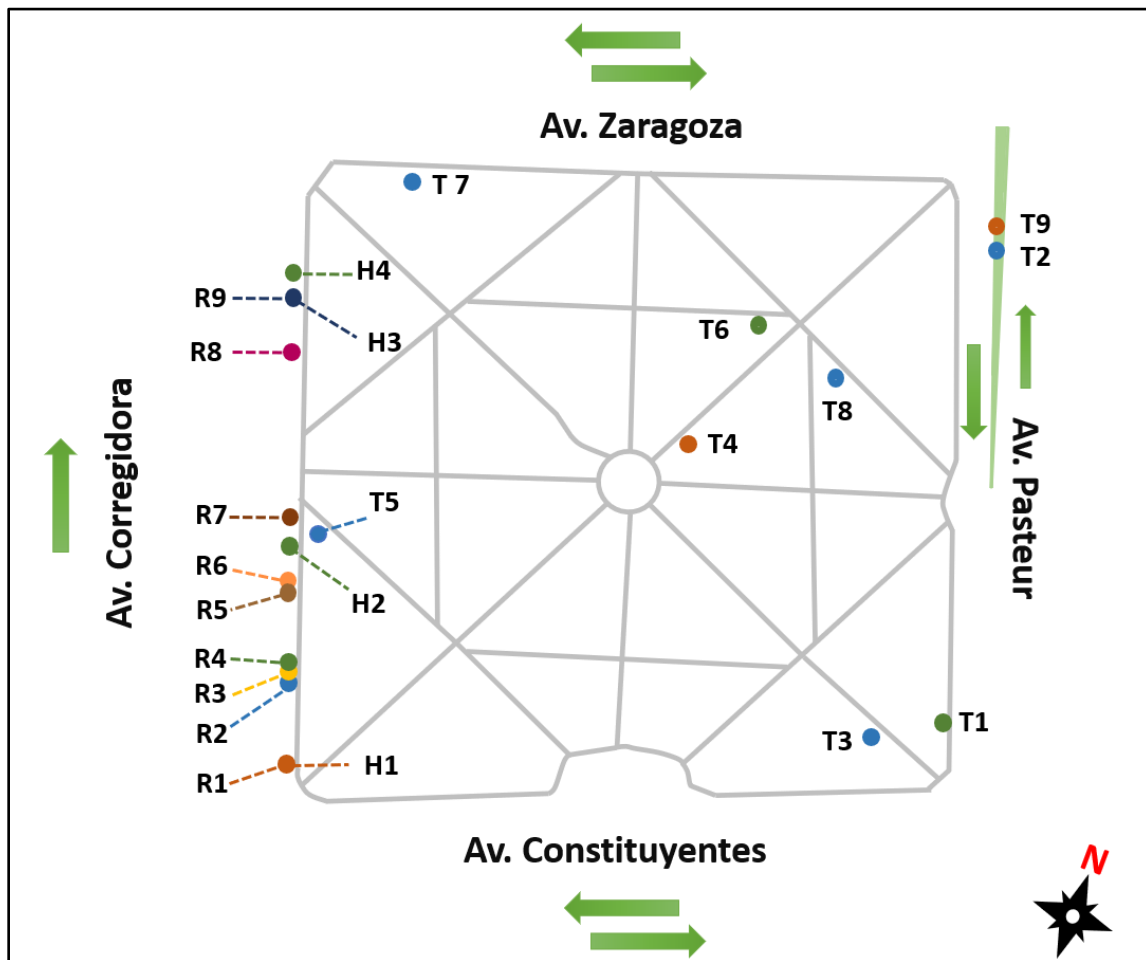


Figura 8: Mapa del parque Alameda Hidalgo con la ubicación de los árboles utilizados para el análisis de la variación de la k_{is} respecto al tiempo (T1- T9), variación de la k_{is} dependiendo de la posición respecto al flujo vehicular (R1-R9) y para el análisis de la variación altitudinal de la k_{is} (H1-H4). Las flechas verdes indican la dirección del flujo vehicular. Los árboles T2 y T9 se encuentran ubicados sobre un camellón representado por un triángulo verde en la imagen.

c) Variación altitudinal de la k_{is} en corteza de árboles

Para analizar la variación altitudinal de la k_{is} (representada en color naranja en la Figura 7) se seleccionaron cuatro fresnos (*Fraxinus* sp.) ubicados sobre Av. Corregidora (H1, H2, H3 y H4 en la Figura 8 y Tabla 1) elegidos por su tronco recto y corteza relativamente homogénea. Para cada uno de estos árboles se realizaron mediciones sobre su tronco a 1 m, 1.5 m y 2 m de altura sobre la superficie del tronco que estaba expuesta directamente hacia la calle y la cara opuesta (viendo hacia el parque). Se hicieron tres repeticiones de la medición en cada punto para obtener el valor representativo de k_{is} y se utilizó la desviación estándar como el error. Es importante mencionar que para esta prueba se comenzó a medir a partir de 1 m de altura ya que por debajo de esta altura el tronco no era lo suficientemente recto para permitir que las mediciones se realizaran adecuadamente y, además de esto, se encontraba cubierto por cal.

La selección de árboles para esta prueba fue aún más estricta que para las anteriores, debido a que se buscó que la corteza de cada árbol fuera lo más homogénea posible en todos los puntos a medir a las diferentes alturas de una misma cara. De esta manera se buscaba eliminar la mayor cantidad de variables posibles a fin de hacer estos puntos comparables entre las 3 alturas de una misma cara del tronco. Debido a esto, la cantidad de árboles que cumplían con esta característica y las mencionadas en las pruebas anteriores se redujo a solo cuatro.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos se realizaron análisis de varianza y de correlación de la siguiente manera:

- **Variación de k_{is} en el tiempo**

Para evaluar el efecto del tiempo sobre la k_{is} en los árboles, se realizaron análisis de varianza para cada uno de estos (T1-T9). Se tomaron en cuenta todos los datos obtenidos del 18 de enero al 18 de febrero del 2020 para el árbol T1 y del 8 al 20 de febrero de 2020 para los árboles T2-T9.

- **Correlación entre k_{is} y precipitación**

La relación entre la precipitación y las k_{is} de todos los árboles se evaluó mediante un análisis de correlación, y también se estimó en particular para el árbol T1.

- **Análisis de la k_{is} antes y durante el confinamiento**

Para evaluar el efecto del confinamiento durante la pandemia sobre la k_{is} , se realizó un análisis de varianza considerando los datos antes del confinamiento y durante este (7 semanas después de haber iniciado) en los árboles T2-T9.

- **Análisis de variación de k_{is} respecto al flujo vehicular**

El efecto de la exposición de los árboles al flujo vehicular sobre los valores de k_{is} también fue evaluado mediante un análisis de varianza entre la k_{is} de la superficie árboles R1-R9 frente a la calle (la más expuesta a la corriente de aire generada por el flujo vehicular) y frente al parque (la más protegida).

Los análisis de varianza fueron realizados con Excel para Microsoft 365, mientras que para el análisis de correlación se utilizó el programa Statistica 8.0 (StatSoft, 2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se utilizaron nueve árboles para analizar la variación temporal de la k_{is} , otros nueve árboles para conocer la variación de la k_{is} respecto al flujo vehicular y finalmente cuatro árboles para observar la variación altitudinal de la k_{is} sobre la corteza. Los árboles utilizados para el estudio de la variación temporal también fueron considerados para conocer el comportamiento de la k_{is} después de los días con lluvia, así como antes y durante el confinamiento debido a la pandemia por el virus SARS-COV-2, y finalmente para analizar el cambio en la k_{is} conforme aumentaba la distancia de los árboles respecto a la calle. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de estas pruebas:

a) Variación temporal de la k_{is}

Primera parte: estudio piloto (árbol T1)

En la Figura 9 se presentan los datos de k_{is} sobre los 8 puntos seleccionados en la corteza del árbol T1, medidos del 18 de enero al 9 de mayo de 2020. Inicialmente se había planteado que los 8 puntos estuvieran orientados al N, NE, E, SE, S, SW, W y NW, sin embargo, para los fines de esta prueba estas orientaciones fueron utilizadas únicamente como identificador de cada uno de los puntos. Lo anterior debido a que no todos ellos pudieron ser medidos exactamente sobre la orientación correspondiente debido a que las características de la corteza (irregular y erosionada) y el tronco (no era completamente recto) en esas áreas no eran adecuadas para poder colocar el SM-30 sin dejar un espacio vacío entre ambos.

A pesar de que los puntos no fueron representativos para las orientaciones inicialmente seleccionadas, esto no afectó la utilidad de los datos, pues con esta prueba se buscaba analizar la variabilidad de la k_{is} a través del tiempo sobre cada uno de los puntos.

Para todos los puntos medidos en el árbol T1 se observa que la k_{is} se mantiene sin cambios significativos durante todo el periodo medido (Figura 9), esto es consistente con el análisis de varianza para el árbol T1 (Tabla 2), el cual mostró que no hay un efecto significativo del tiempo sobre la k_{is} ($F_{11,468}=0.31$, $p>0.05$).

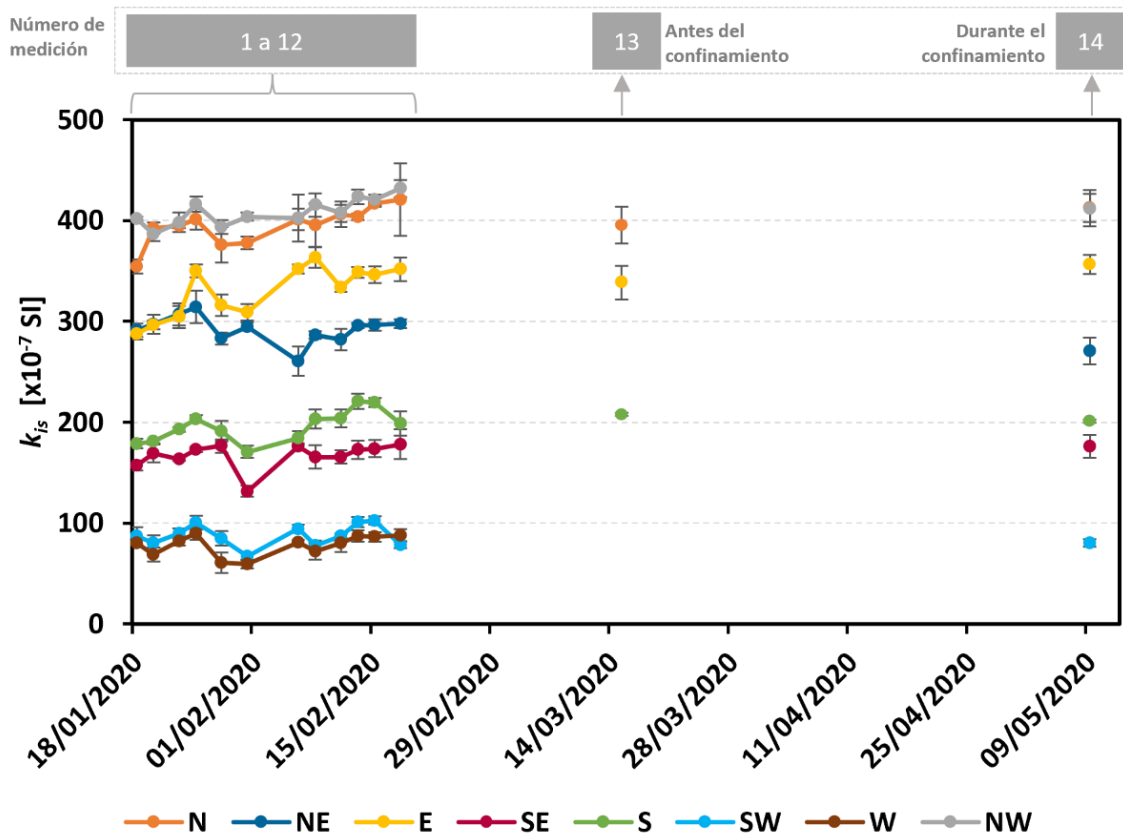


Figura 9: k_{is} del árbol T1 de enero a mayo de 2020. Las barras de error que no pueden ser apreciadas se deben a que el error es tan pequeño que la barra se encuentra oculta tras el punto representativo de cada dato.

A partir de esta prueba se obtuvieron aprendizajes sobre las características ideales para la selección de puntos a analizar sobre la corteza de los árboles, como medir únicamente sobre troncos rectos sin abultamientos cuya corteza sea lo más homogénea posible e idealmente que no se encuentre erosionada o tenga irregularidades sobre el sitio a medir.

Segunda parte (árboles T2-T9)

Para la segunda parte de esta prueba se retomaron los aprendizajes obtenidos a partir de las mediciones realizadas al árbol T1, por lo que para los árboles T2 al T9 se seleccionaron con mayor detalle, tanto los árboles como los puntos a medir sobre su corteza, buscando que los puntos seleccionados cumplieran lo mejor posible con las características ideales para la medición mencionadas en el párrafo anterior. Además, se procuró que los puntos

de medición seleccionados estuvieran mejor orientados hacia el N, W, S y E; sin embargo, no en todos los casos fue posible debido a las características propias de cada uno de los árboles, p.ej. corteza erosionada por acción antropogénica o que el tronco no era lo suficientemente recto sobre la superficie a medir. Al igual que para el árbol T1, esto es poco relevante para el objetivo de esta prueba ya que las orientaciones se utilizaron únicamente con el fin de identificar cada uno de los puntos medidos en un mismo árbol.

Es importante mencionar que, para esta prueba, la corteza de los puntos seleccionados podía variar en su textura tanto de un árbol a otro, como entre los puntos seleccionados para un mismo árbol. Es por esto por lo que, con el análisis de datos específicamente para esta prueba, se buscaba observar si existía una tendencia general de variación de la k_{is} a través del tiempo.

En la Figura 10 se muestran los valores de k_{is} obtenidos del 8 de febrero al 9 de mayo del 2020 para los árboles T2 al T9. Se puede apreciar que la barra de error en la mayoría de los casos es tan pequeña que no se ve en la gráfica, lo que indica una gran precisión al momento de la toma de las mediciones y por ende una mayor confianza en los datos. Asimismo, de acuerdo con el análisis de varianza, no se encontró un efecto significativo del tiempo sobre la k_{is} en la corteza para ninguno de los árboles (Tabla 2).

Tabla 2: Resultados del análisis de varianza de una vía para el efecto del tiempo sobre la k_{is} en la corteza de los árboles

| Árbol | N | g.l. | | F | p |
|-------|-----|--------------|----------------------|------|------|
| | | Entre grupos | Dentro de los grupos | | |
| T1 | 480 | 11 | 468 | 0.31 | 0.98 |
| T2 | 36 | 5 | 30 | 0.02 | 0.99 |
| T3 | 72 | 5 | 66 | 0.03 | 0.99 |
| T4 | 72 | 5 | 66 | 0.24 | 0.94 |
| T5 | 72 | 5 | 66 | 0.02 | 0.99 |
| T6 | 72 | 5 | 66 | 1.17 | 0.32 |
| T7 | 72 | 5 | 66 | 0.08 | 0.99 |
| T8 | 72 | 5 | 66 | 0.20 | 0.96 |
| T9 | 90 | 5 | 84 | 0.02 | 0.99 |

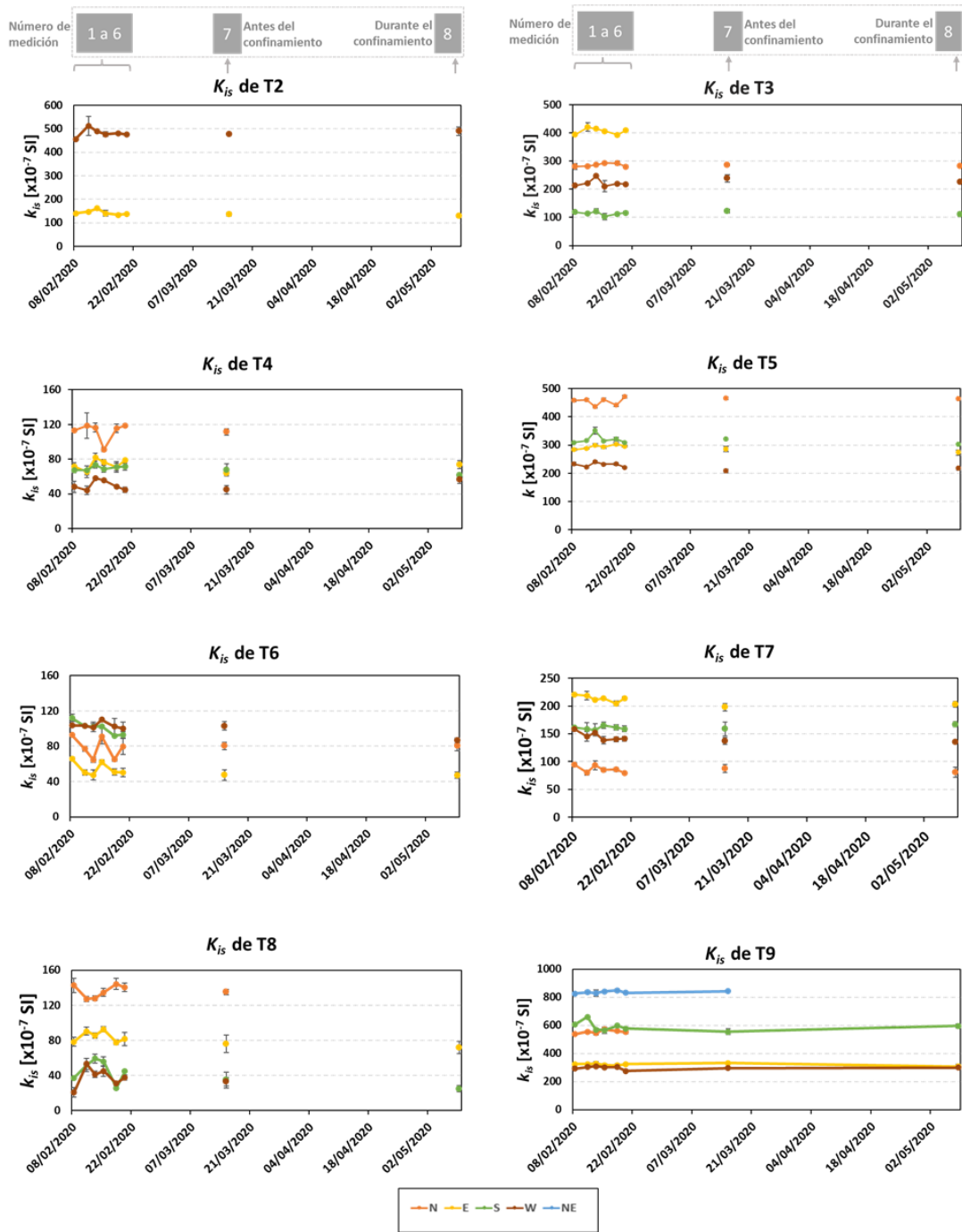


Figura 10: k_{is} de los árboles T2 - T9 de febrero a mayo de 2020. Las barras de error que no pueden ser apreciadas en las gráficas se deben a que el error es tan pequeño que la barra se encuentra oculta tras el punto representativo de cada dato. Nótese que la escala en el eje "y" es distinta para cada árbol.

Contrario a los resultados obtenidos por Castañeda-Miranda *et al.* (2020) en la investigación realizada con hojas de *Ficus benjamina* como biomonitor (en la que se registró un aumento progresivo en la susceptibilidad magnética específica después de una lluvia > 3 mm hasta llegar a un punto de equilibrio entre pérdidas y ganancias de partículas a los 15 días), en esta prueba no se observó una tendencia de aumento en la k_{is} , sino que los valores fueron estables durante todo el periodo medido. Aunado a esto, el análisis de varianza para todos los árboles indicó que no existía un efecto significativo del tiempo sobre la k_{is} en los árboles. Esto hace evidente la diferencia entre el mecanismo de acumulación de partículas magnéticas sobre las hojas de los árboles y la corteza de éstos, en donde la corteza no muestra un cambio en la k_{is} a pesar del paso del tiempo. Esto podría deberse a varias razones, ya sea a que la corteza ya había llegado a un máximo punto de saturación de partículas cuando se comenzó a medir, se encontraba en equilibrio entre pérdida y ganancias de partículas, la escala de tiempo en que se acumulan las partículas en la corteza es mayor al tiempo estudiado o a que probablemente ninguna nueva partícula se adhirió durante el periodo observado. Para conocer con precisión a cuál de estas razones se debe el que no se presente un cambio en la k_{is} , para futuras investigaciones se podría analizar cómo es el patrón de acumulación de partículas sobre la corteza de árboles que no hayan sido expuestos a la contaminación del aire a partir del momento en que comiencen a exponerse.

Comportamiento de la k_{is} en relación con la precipitación y NMDE

En la Figura 11 se muestran los datos de precipitación del 18 de enero al 14 de marzo junto con los promedios diarios de todos los datos obtenidos de k_{is} para cada uno de los árboles "T". En la gráfica de barras se muestran los mm de precipitación durante este periodo y con puntos los promedios diarios de k_{is} para cada árbol analizado. Durante este periodo solo 4 días tuvieron una precipitación > 3 mm. A pesar de que hubo lluvias de 13.2, 6.6 y 7.6 mm (en orden de aparición), los resultados del análisis de correlación entre la precipitación y la k_{is} de los árboles T1-T9 indican que no hay una correlación significativa entre estos parámetros ($r=0.009$). Esto quiere decir que ninguna de las lluvias registradas provocó un cambio estadísticamente significativo de la k_{is} en los árboles.

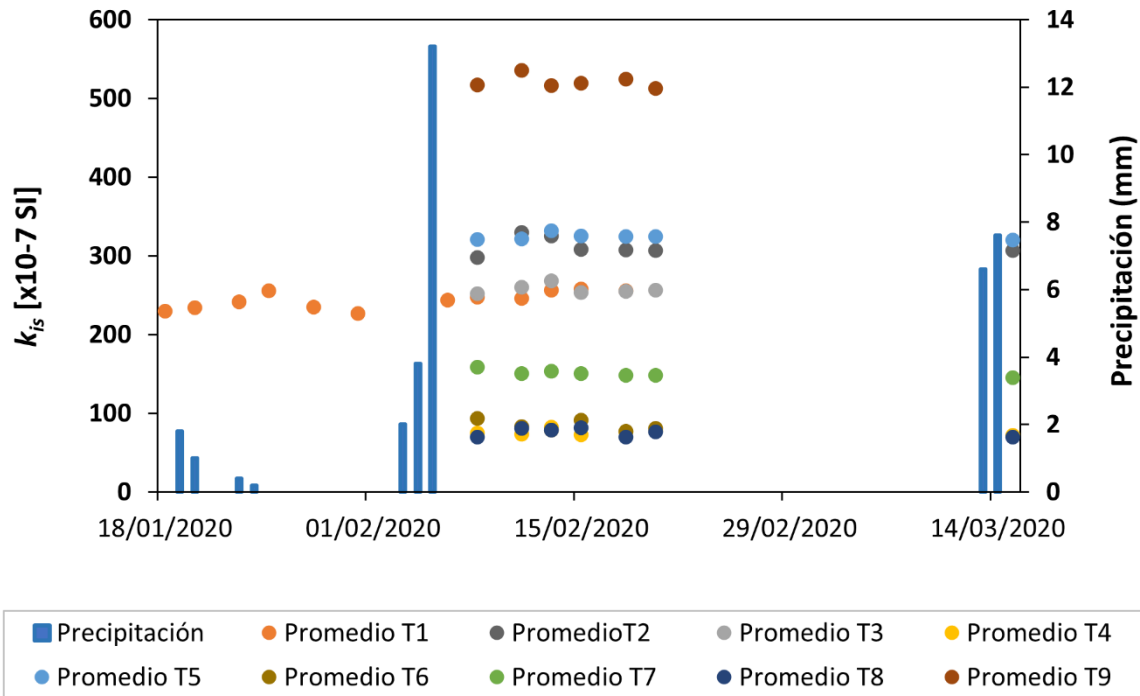


Figura 11: k_{is} promedio en los árboles T1-T9 y precipitación del 18 de enero al 14 de marzo 2020. Cada punto representa el promedio diario de la k_{is} para el árbol correspondiente.

En la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos para cada punto medido del árbol T1 en comparación con la precipitación. Se puede apreciar que a pesar de la lluvia de 13.2 mm del 5 de febrero, la k_{is} posterior a esta fecha no presenta una diferencia respecto a las anteriores. Aunado a esto, la correlación entre la precipitación y la k_{is} del árbol T1 mostró una tendencia negativa ($r=-0.31$), no obstante, no fue estadísticamente significativa. De acuerdo con esto, se infiere que una precipitación $\leq 13 \frac{mm}{día}$ no genera un lavado de partículas magnéticas en la corteza del árbol T1.

De acuerdo con lo anterior, se puede observar que el uso de corteza de árbol como bioacumulador presenta ventajas frente a las hojas de árbol y líquenes debido a que una precipitación $\leq 13mm/día$ (la más alta reportada durante el periodo medido) no genera un lavado de partículas sobre la corteza. Mitchell *et al.* (2010) reportaron que para las hojas de los árboles de tilo (*Tilia platyphyllos*) y abedul (*Betula pendula*) se requería de 6 días con

una precipitación $< 3 \frac{mm}{día}$ para llegar a un equilibrio dinámico entre las pérdidas y ganancias de partículas, mientras que Castañeda-Miranda *et al.* (2020) concluyeron que para el ficus (*Ficus benjamina*) se necesitaba de 15 días para llegar a este equilibrio después de una lluvia $> 3 \frac{mm}{día}$. Asimismo, Maher *et al.* (2008) reportaron que hubo una disminución de entre el 5 y 30 % de la concentración de metales en hojas de abedul (*Betula pendula*) tras una tormenta. Matzka & Maher (1999) afirmaron que la lluvia producía una disminución en las cargas magnéticas de las hojas de los árboles y Marié *et al.* (2018) mencionan que la precipitación produjo una disminución en la k_{is} de líquenes.

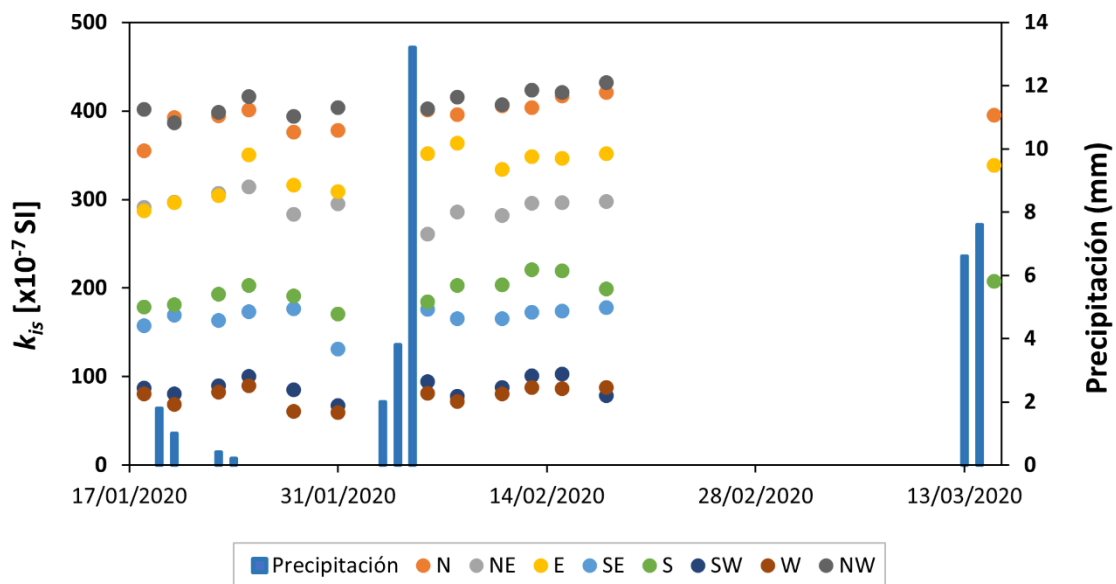


Figura 12: k_{is} del árbol T1 en todos sus puntos medidos y precipitación del 18 de enero al 14 de marzo de 2020. Cada punto representa la k_{is} diaria para cada orientación medida del árbol T1.

Por lo anterior, la corteza de árbol representa una nueva oportunidad en su uso como biomonitor magnético, ya que permite realizar mediciones de susceptibilidad aún durante periodos con lluvia; además de que elimina el tiempo de espera para poder realizar las mediciones, al no ser necesario esperar un número determinado de días de exposición posterior a una precipitación de esta magnitud. Es importante mencionar que, al no haberse presentado una precipitación $> \frac{13mm}{día}$, no fue posible determinar cuál era el límite máximo

en milímetros de precipitación que podía soportar la corteza sin presentar una disminución en la k_{is} .

Debido a que durante el periodo analizado no se presentó una lluvia que generara una disminución en la k_{is} , y por tanto un lavado de partículas en la corteza, no fue posible determinar el NMDE conveniente para la corteza. Sin embargo, al no observarse una disminución en la k_{is} tras una precipitación de $13 \frac{mm}{día}$, se estableció para este estudio, que las mediciones de k_{is} podían realizarse sobre la corteza sin necesidad de esperar un NMDE tras una lluvia $\leq 13 \frac{mm}{día}$. Este criterio fue utilizado para realizar las mediciones correspondientes a la segunda y tercera prueba de esta tesis.

k_{is} durante confinamiento por COVID-19

A partir de la suspensión de actividades académicas presenciales en Querétaro el 17 de marzo de 2020, y el posterior inicio de la *Jornada Nacional de Sana Distancia* el 23 de marzo del mismo año, debido a la contingencia sanitaria por COVID-19, se presentó una disminución del tráfico vehicular de hasta 49% para el TPDS y 75% para el TPFs respecto al 2019 entre los meses de marzo y mayo (Obregón *et al.*, 2020). A pesar de este descenso, los datos obtenidos antes de comenzar el confinamiento (15 de marzo de 2020) y siete semanas después de que éste iniciara (8-9 de mayo 2020), la k_{is} no mostró una disminución entre estas dos fechas. Los resultados del análisis de varianza para los árboles T2-T9 señalan que no hubo un efecto estadísticamente significativo del confinamiento sobre la k_{is} en la corteza de los árboles ($F_{1,136}=0.007$, $p>0.05$). Esto puede ser observado en la Figura 9 y Figura 10, donde para todos los árboles en todos los puntos medidos, la k_{is} se mantiene sin cambios significativos tanto antes como durante el periodo de confinamiento debido a la pandemia.

Esto concuerda con los resultados obtenidos por Wang & Li (2021) quienes encontraron que no hubo una reducción suficientemente significativa en la concentración $PM_{2.5}$ del 2020 respecto al promedio de los años 2017-2019 para el caso de la Ciudad de México. Sin

embargo, para conocer cómo fue el comportamiento del PM en la ciudad de Querétaro durante el periodo de confinamiento y mayor reducción del tráfico vehicular, sería necesario complementar la información con los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en Querétaro. Asimismo, sería conveniente analizar cuánto tiempo tarda un árbol que no ha sido expuesto a la contaminación del aire en llegar a su máximo punto de saturación de PM -a través del uso de la k_{is} como proxy- a partir de la fecha en que comienza a ser expuesto, así como conocer la escala de tiempo en que se acumulan las partículas.

b) Variación de la k_{is} respecto al flujo vehicular

En la Figura 13 se muestran los resultados obtenidos para los 9 árboles seleccionados para analizar la k_{is} respecto al flujo vehicular: en color azul oscuro se muestra la k_{is} obtenida en la superficie del árbol orientada hacia al parque y en azul claro se presentan los datos para la superficie orientada hacia a la calle. Como se puede observar, para todos los árboles -excepto el R4 y R6- la k_{is} es mayor en la superficie del tronco orientada hacia al parque, la cual es la que supuestamente está más protegida de la corriente de aire generada por el constante flujo vehicular. El análisis de varianza para los árboles R1-R9 mostró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre la k_{is} de la superficie de los árboles frente al parque y la superficie frente a la calle ($F_{1,88}=27.17$, $p<0.05$).

Esto es consistente con lo encontrado por Kletetschka (2011) en un estudio realizado con arces rojos (*Acer rubrum*) ubicados dentro de un bosque al lado de la autopista Washington-Baltimore, en donde se observó que la corteza de los árboles orientada hacia el bosque tenía una mayor concentración de partículas magnéticas que la orientada hacia la carretera. Kletetschka (2011) explica esto a través de un modelo de circulación del aire, en el que la corriente de aire generada por el flujo vehicular provoca una disminución en la humedad de la superficie del tronco orientada hacia la carretera; en contraste, la cara del tronco protegida de la corriente de aire de los autos presenta una mayor humedad, por lo que su potencial adhesivo para capturar partículas es mayor que el de la cara orientada hacia la carretera. El modelo planteado parece ser aplicable al área analizada en este estudio, ya que las condiciones de los árboles son similares a las analizadas por Kletetschka (2011) al

tener una superficie del tronco directamente expuesta a la corriente de aire generada por el flujo vehicular (hacia la calle) y otra protegida de ésta (hacia el parque). Por lo tanto, es posible que este modelo de circulación del aire también se esté presentando dentro de los árboles analizados en este estudio. Lo cual significa, que cuando un árbol se encuentre expuesto a una corriente de aire generada por los vehículos (que representan la principal fuente de emisión de partículas magnéticas contaminantes), habrá una mayor concentración de partículas magnéticas en la cara del tronco que se encuentre protegida de la corriente de aire.

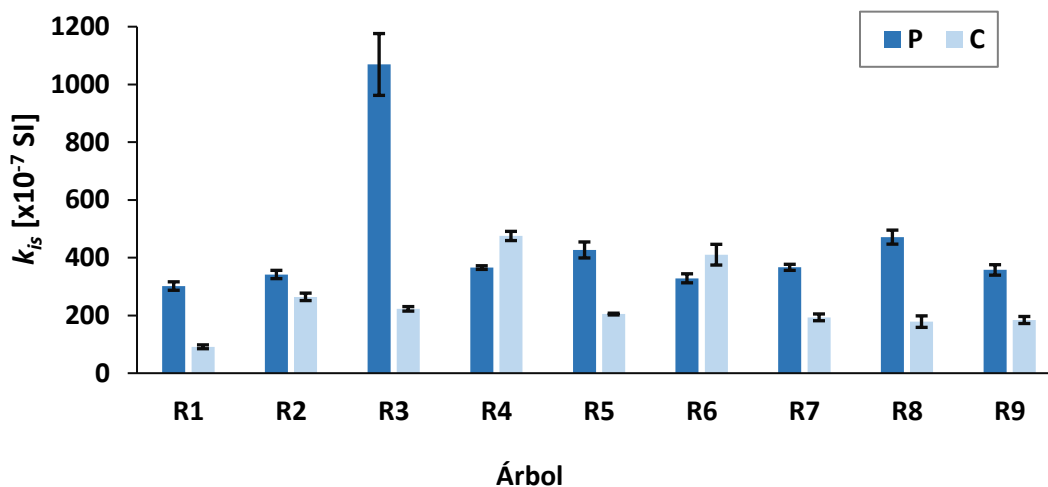


Figura 13: k_{fs} sobre la corteza de los árboles ubicados en la banqueta de Av. Corregidora en la superficie orientada hacia la calle (en color azul claro y denotada por la letra “C”) y la cara orientada hacia al parque (en azul oscuro y denotada por la letra “P”).

Para el caso particular de los árboles R4 y R6, la diferencia respecto al resto de los árboles podría deberse a condiciones particulares del árbol y el área seleccionada para realizar la medición, incluso a la influencia antropogénica directa sobre la corteza. En el caso del árbol R4 la superficie que se encontraba orientada hacia la calle podía notarse ligeramente más desgastada que la superficie opuesta. Lo anterior podría deberse a la continua erosión de la corteza debido al tacto de las personas sobre esa superficie. Para el caso del árbol R6 no

se observó ninguna variación en la textura de la superficie de la corteza entre un lado y otro, únicamente se percibió un ligero cambio en su color, en donde la superficie frente a la calle tenía un color más oscuro que la que se encontraba orientada hacia el parque.

c) Variación altitudinal de la k_{is} en corteza de árboles

Como parte de la prueba para analizar cómo variaba la k_{is} dependiendo de la altura sobre la corteza del árbol en la que se tomaba la medición, se obtuvieron los resultados presentados en la Figura 14 para los árboles H1, H2, H3 y H4 ubicados a un costado del parque Alameda Hidalgo sobre Av. Corregidora (Figura 8). Se muestran los datos obtenidos a 1, 1.5 y 2 m de altura sobre el suelo del árbol; en color azul oscuro se encuentra la k_{is} en la superficie del tronco orientada hacia el parque, mientras que en color azul claro se presenta la k_{is} de la superficie orientada hacia la calle para estas alturas.

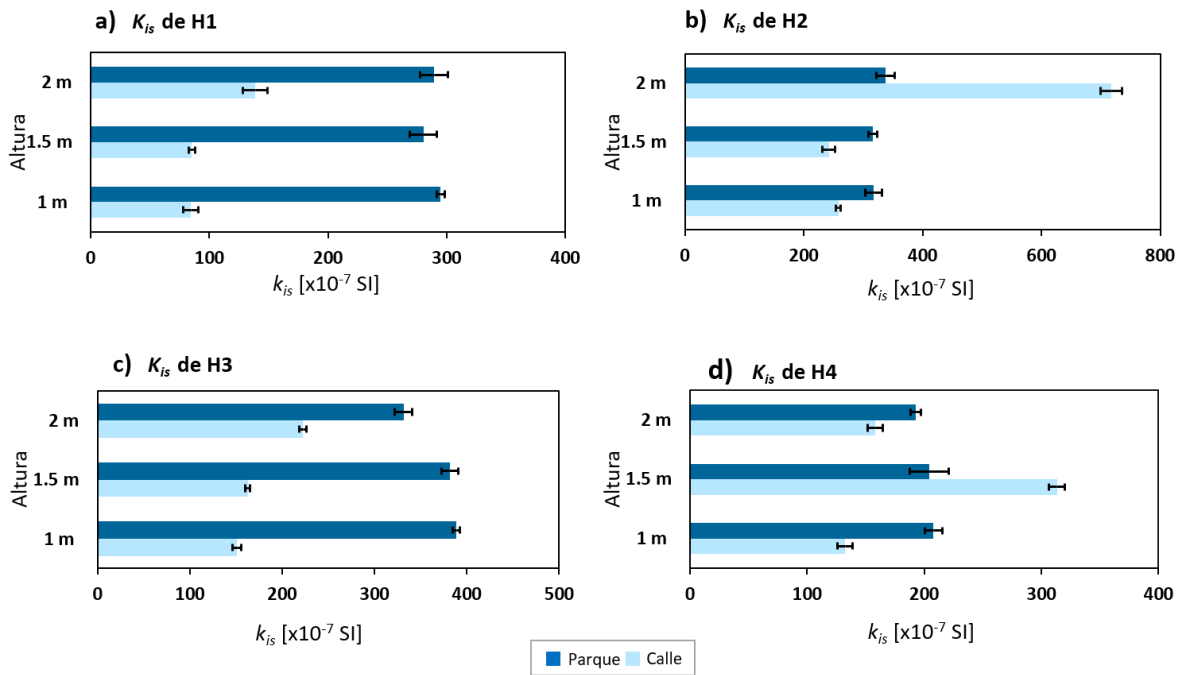


Figura 14: k_{is} de la corteza de los árboles H1, H2, H3 y H4 a diferentes alturas en la superficie del tronco orientada hacia el parque y la superficie orientada frente a la calle.

Se observa que para H1, H2 y H4, la k_{is} en la superficie de la corteza frente al parque se mantiene constante en todas las alturas medidas en cada árbol; para el caso del árbol H3 este comportamiento se presenta únicamente a 1 y 1.5 m de altura. En contraste, en las

superficies de la corteza orientadas frente a la calle, para los árboles H2 y H4, la k_{is} no tiene una tendencia definida y, para los árboles H1 y H3, la k_{is} a 1 y 1.5 m son similares entre ellas y menores a la k_{is} presentada a los 2 m. En general, se observa que la k_{is} tiene un comportamiento heterogéneo del lado del árbol orientado hacia la calle y en el orientado hacia al parque la k_{is} es homogénea a todas las alturas dentro de un mismo árbol.

A pesar de lo anterior, la k_{is} no presenta una tendencia de ser mayor a una determinada altura. Esto contrasta con los resultados de Maher *et al.* (2008) quienes analizaron la concentración de partículas de plomo y hierro en hojas de abedul (*Betula pendula*) a diferentes alturas y encontraron que había una mayor concentración de partículas a los 0.3 m y entre 1.5 – 2m de altura. El que este patrón no se haya observado en los resultados de este experimento (el cual no incluyó mediciones a 0.3 m), implica que es necesario realizar más estudios para conocer cuál es la velocidad de acumulación de partículas dentro de la corteza de los árboles, como el mencionado anteriormente de analizar el patrón de acumulación de partículas en un árbol que no había sido expuesto a la contaminación a partir de que comienza a serlo. Además, sería conveniente realizar estudios complementarios con otros biomonitores para saber si, dependiendo del biomonitor utilizado, la concentración de partículas magnéticas presenta el mismo comportamiento que el descrito por Maher *et al.* (2008).

Ambas situaciones, una k_{is} homogénea a todas las alturas medidas del mismo lado de la corteza hacia al parque y una k_{is} heterogénea del lado de la calle, parecen ser coherentes con la idea del modelo de circulación de aire planteado por Kletetschka (2011) y lo observado en la prueba de la variación de k_{is} respecto a la orientación con el flujo vehicular; en donde, la k_{is} de la corteza orientada hacia al parque era mayor que la expuesta al flujo vehicular para ambos casos. Una mayor humedad en la corteza del lado del parque podría explicar el hecho de que la k_{is} sea tan constante entre 1 m y 2 m de altura en cada árbol, al tener un mayor potencial adhesivo y con esto retener mejor las partículas.

El que la k_{is} en la corteza del árbol frente al parque sea la misma para todas las alturas puede explicarse también con los resultados de la prueba del comportamiento de la k_{is} en función

del tiempo, en donde no se encontraron cambios significativos ni con la disminución del tráfico vehicular, ni tras la precipitación y tampoco con el paso del tiempo. Los resultados de estas dos pruebas sugieren que la corteza tiene un máximo punto de acumulación de partículas, y que todos los árboles analizados ya lo habían alcanzado al momento en que se realizaron las primeras mediciones. También significa que la corteza de árbol es una excelente opción para realizar un biomonitorio de partículas magnéticas con una mayor resolución espacial al no presentar pérdida de estas debido al paso del tiempo, la precipitación o la altura.

Es importante aclarar que los resultados de esta prueba no significan que la concentración de material particulado magnético sea la misma a todas las alturas, sino que la corteza de los árboles analizados se encontraba ya en su máximo punto de saturación aun cuando el tiempo que tardó en saturarse a cada altura haya sido distinto. Para conocer si existe una altura en la que la k_{is} es mayor sobre la corteza de los árboles sería importante repetir esta prueba, pero con la corteza de un árbol que no haya estado expuesta a la contaminación del aire y a través del tiempo ir analizando los cambios en su k_{is} a las diferentes alturas, a partir del momento en que comience su exposición a la contaminación, tal como fue realizado por Castañeda-Miranda *et al.* (2020) con las hojas de *F. benjamina*, aunque habría que analizar la viabilidad de realizar esta clase de estudio utilizando corteza de árbol.

Lo anterior significa que para utilizar la k_{is} como un proxy de la contaminación del aire, usando la corteza de árboles para realizar un biomonitorio, lo más conveniente es medir la k_{is} sobre la superficie del tronco que se encuentre más protegida de la corriente de aire producida por los vehículos, pudiendo tomar las mediciones entre 1 y 2 m de altura con la certeza de que será homogénea en este rango.

d) Variación de la k_{is} en función de la distancia del árbol respecto a la calle

Adicionalmente a los resultados mencionados en el *inciso a* respecto a la variación temporal de la k_{is} y su relación con la precipitación y el confinamiento por COVID-19, los datos obtenidos en esa prueba sirvieron también para analizar cómo variaba la k_{is} en función de

la distancia respecto a la calle más cercana y, por ende, a la fuente de emisión de las partículas magnéticas (vehículos).

En la Figura 15 se presenta una comparación de todos los datos de k_{is} obtenidos para todas las orientaciones durante el periodo medido para cada uno de los árboles de *C. cunninghamiana* (T9, T2, T1, T5, T6 y T4 en orden de aparición). Las gráficas de caja fueron ordenadas intencionalmente de menor a mayor distancia (de izquierda a derecha en la gráfica) en relación con la calle más cercana del árbol correspondiente, cuya ubicación puede ser apreciada en la Figura 8. Se puede observar que los árboles T9 y T2, ubicados en el camellón de Av. Pasteur, tienen los valores de k_{is} más altos al ser los más cercanos a la calle. A estos les siguen los árboles T1 y T5 ubicados en las orillas del parque, a una distancia de $\sim 9.8\text{ m}$ de Av. Pasteur y $\sim 11.3\text{ m}$ de Av. Corregidora respectivamente. Finalmente, se observa a los árboles T6 y T4 con los valores más bajos, siendo T4 el árbol con la menor k_{is} al encontrarse casi al centro del parque y, por tanto, el más alejado de la calle.

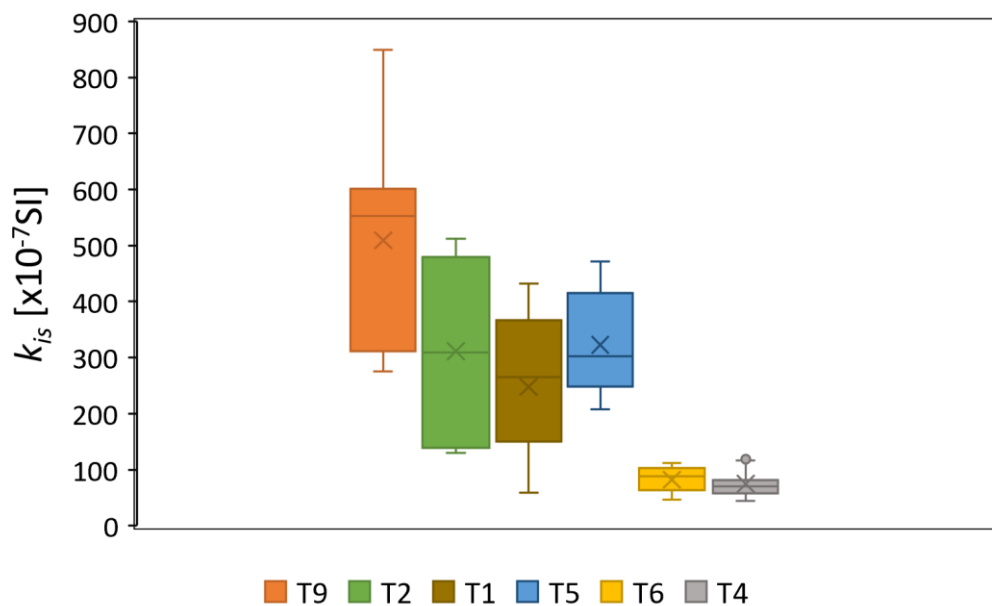


Figura 15: k_{is} de todos los árboles *C. cunninghamiana* (T9, T2, T1, T5, T6 y T4 ordenados de menor a mayor distancia -de izquierda a derecha- respecto a la avenida más cercana para cada árbol) utilizando todos los datos obtenidos durante el periodo de medición en cada árbol para todas las orientaciones. La caja delimita el rango del segundo y tercer cuartil, la línea horizontal dentro de la caja representa la mediana y la "x" el promedio de los datos.

Lo anterior implica que a menor distancia respecto a la calle mayor será la k_{is} . Esta relación entre la distancia a la calle y la k_{is} indica que los vehículos son la principal fuente de emisión de las partículas magnéticas capturadas por la corteza de los árboles, al no haber ninguna otra fuente de emisión de éstas cercana al parque. Esto concuerda con los resultados de una investigación previa en la que se señaló a los vehículos como la principal fuente de emisión de PM magnético dentro del centro de Querétaro (Castañeda-Miranda *et al.*, 2014).

La relación entre la k_{is} y la distancia a la fuente de emisión observada en este análisis es consistente con los resultados de varias investigaciones. En un biomonitoreo magnético realizado con hojas de árboles se señaló a los vehículos como la principal fuente de emisión de PM magnético y se observó el mismo comportamiento en la relación de mayores valores magnéticos cercanos a la carretera y la disminución de ellos conforme aumentaba la distancia al camino (Matzka & Maher, 1999). En una investigación realizada sobre el suelo de un bosque atravesado por una carretera con tráfico pesado, se encontró que la contaminación magnética era mayor entre más cerca estuviera el suelo de la carretera y disminuía conforme se adentraba al bosque (Kletetschka, 2011). En un estudio realizado en la ciudad de Tandil en Argentina, en el que analizaron la k_{is} en líquenes, encontraron que ésta era mayor en los líquenes que se encontraban cercanos a fábricas metalúrgicas y avenidas con tráfico pesado que en la de un liquen ubicado dentro de un parque con mínima influencia de contaminación (Marié *et al.*, 2018). Asimismo, en la investigación realizada por Maher *et al.* (2008) en Norwich, Inglaterra se observó que las partículas acumuladas en hojas de los árboles urbanos a un lado de la carretera presentaban valores de hierro y plomo mucho más elevados que la de las hojas dentro de un área verde.

De acuerdo con los resultados de la variación de la k_{is} en relación con su distancia a la calle, la corteza de los árboles puede ser utilizada para realizar un biomonitoreo que permita analizar espacialmente la contaminación del aire por partículas magnéticas. Esto resulta especialmente relevante para evaluar la distribución del PM magnético dentro de la ciudad, al ser este un factor de riesgo para la salud, ya que a través del uso de la k_{is} como proxy de la contaminación por partículas magnéticas se podrían identificar zonas críticas con mayor contaminación del aire por PM magnético.

CONCLUSIONES

- Durante el periodo medido no se encontró un efecto significativo del tiempo sobre la k_{is} en la corteza de los árboles, para futuras investigaciones se sugiere analizar el patrón de acumulación temporal del PM magnético sobre la corteza.
- El uso de la corteza de árboles para realizar biomonitoreos de contaminación por PM magnético presenta ventajas frente a otros bioacumuladores, como hojas de árboles y líquenes, al no mostrar un lavado de partículas magnéticas después de precipitaciones $\leq \frac{13mm}{día}$.
- No fue posible determinar el número mínimo de días de exposición (NMDE) necesarios después de una precipitación que generara un lavado de partículas sobre la corteza, ya que tras la precipitación más alta registrada ($13mm$) no se observó una disminución en la k_{is} .
- No se presentó un efecto estadísticamente significativo del confinamiento debido a la pandemia por SARS-COV-2 sobre la k_{is} en la corteza de los árboles. Sin embargo, para conocer el comportamiento del PM en la ciudad de Querétaro durante el periodo de confinamiento y mayor reducción del tráfico vehicular, sería necesario realizar análisis adicionales utilizando los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en Querétaro
- Se encontró una diferencia estadísticamente significativa de la k_{is} en relación con la orientación de la corteza frente a la corriente de aire generada por el flujo vehicular, en donde la superficie más protegida de la corriente presentó una mayor k_{is} .
- La k_{is} no presentó una tendencia de ser mayor a una determinada altura sobre el tronco de los árboles.
- Los valores más altos de k_{is} se observaron en los árboles más cercanos a la calle y los valores más bajos en los árboles más alejados, lo que señala a los vehículos como la principal fuente de emisión de PM magnético, así como que, a mayor distancia de la fuente de contaminación menor será la k_{is} .

- La k_{is} medida sobre la corteza de los árboles puede ser utilizada como un proxy de contaminación por PM magnético para analizar la distribución espacial de las partículas. Esto podría ser útil para identificar zonas con mayor contaminación del aire por partículas magnéticas dentro de las ciudades, especialmente considerando el riesgo para la salud que representa este contaminante.
- Durante el periodo medido no hubo suficiente evidencia para determinar si la k_{is} medida sobre la corteza de los árboles puede ser utilizada como proxy de contaminación por PM magnético para analizar su variación temporal, ya que no se observó un efecto significativo del tiempo sobre la k_{is} .

REFERENCIAS

- Abas, A. (2021). A systematic review on biomonitoring using lichen as the biological indicator: A decade of practices, progress and challenges. *Ecological Indicators*.
- Calderón-Garcidueñas, L., González-Maciel, A., Mukherjee, P., Reynoso-Robles, R., Pérez-Guillé, B., Gayosso-Chávez, C., . . . Maher, B. (2019). Combustion- and friction-derived magnetic air pollution nanoparticles in human hearts. *Environmental Research*.
- Castañeda Miranda, A., Chaparro, M., Chaparro, M., & Böhnelt, H. (2016). Magnetic properties of *Tillandsia recurvata* L. and its use for biomonitoring a Mexican metropolitan area. *Ecological Indicators*, 60, 125-136.
- Castañeda-Miranda, A. G. (2016). Caracterización y monitoreo magnético-ambiental de partículas suspendidas del aire urbano [Tesis de doctorado, UNAM]. México.
- Castañeda-Miranda, A., Böhnelt, H., Chaparro Marcos, A., Pacheco-Castro, A., & Chaparro Mauro, A. (2017). Biomonitorio magnético de la contaminación atmosférica usando hojas de *Ficus Benjamina* en Querétaro (México). *Latinmag Letters*, 7, MA03, 1-5.
- Castañeda-Miranda, A., Böhnelt, H., Molina-Garza, R., & Chaparro, M. (2014). Magnetic evaluation of TSP-filters for air quality monitoring. *Atmospheric Environment*, 163-174.
- Castañeda-Miranda, A., Chaparro, M., Pacheco-Castro, A., Chaparro, M., & Böhnelt, H. (2020). Magnetic biomonitoring of atmospheric dust using tree leaves of *Ficus benjamina* in Querétaro (México). *Environ Monit Assess*.
- Chaparro, M., Chaparro, M., Castañeda-Miranda, A., Marié, D., Gargiulo, J., Lavornia, J., . . . Böhnelt, H. (2020). Fine air pollution particles trapped by street tree barks: In situ magnetic biomonitoring. *Environmental Pollution*.
- Cohen, A., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H., Frostad, J., Estep, K., . . . Forouzanfar, M. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data attributable to ambient air pollution: an analysis of data. *The Lancet*, 1907-1918.
- Dekkers, M., & Pietersen, H. (1992). Magnetic Properties of Lox- Ca Fly Ash: a rapid tool for Fe-assessment and a survey for potentially hazardous elements. *Materials Research Society Symp. Proc*.
- DOF. Diario Oficial de la Federación. (20 de agosto de 2014). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisible para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación. México: Secretaría de Salud.
- Enciso, A. (23 de 03 de 2020). Comienza la Jornada Nacional de Sana Distancia. *La Jornada*.

- EPA. United States Environmental Protection Agency. (2021). *Particulate Matter (PM) Pollution*.
Obtenido de <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- Estrella, V. (27 de mayo de 2020). Querétaro no entrará a la nueva normalidad el 1 de junio. *El Economista*.
- Evans, M., & Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*. Academic Press.
- García-Reynoso, J., Grutter, M., & Cintora-Juárez, D. (2007). Evaluación del riesgo por contaminantes criterio y formaldehído en la Ciudad de México. *Rev. Int. Contami. Ambient.* , 169-175.
- Gonet, T., & Maher, B. (2019). Airborne, Vehicle-Derived Fe-Bearing Nanoparticles in the Urban Environment: A review. *Environmental Science & Technology*, 9970-9991.
- González Sosa, E., & Guevara Escobar, A. (2007). El parque Alameda Hidalgo ¿Una estructura de control de escurrimientos urbanos? *Ciencia@uaq*. Obtenido de https://www.uaq.mx/investigacion/revista_ciencia@uaq/ArchivosPDF/v1-n1/AlamedaHidalgo.pdf
- Hernández-Guerrero, J. (2015). Valoración visual de la calidad ambiental del área urbana de Querétaro, México: la compleja sencillez de valorar el entorno urbano. *Revista de Geografía Norte Grande*, 45-64.
- Hime, N., Marks, G., & Cowie, C. (2018). A Comparison of the Health Effects of Ambient Particulate Matter Air Pollution from Five Emission Sources. *International Journal of Environmental Research and Public Health*.
- Hofman, J., Maher, B., Muxworthy, A., Wuyts, K., Castanheiro, A., & Samson, R. (2017). Biomagnetic Monitoring of Atmospheric Pollution: A Review of Magnetic Signatures form Biological Sensors. *Environmental Science & Technology*, 6648-6664.
- IMCO. Instituto Mexicano para la Competitividad A.C. (2016). *IMCO. Centro de Investigación en Política Pública*. Obtenido de <https://imco.org.mx/como-es-el-mexicano-promedio-via-el-pais/>
- INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2020). *Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019*. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Querétaro 2017*.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Panorama sociodemográfico de Querétaro. Censo de Población y Vivienda 2020*.
- Kletetschka, G. (2011). Magnetic Measurements on Maple and Sequoia Trees. En Petrovský et al. (eds.), *The Earth's Magnetic Interior* (págs. 427-441). IAGA Special Sopron Book Series, vol 1. Springer, Dordrecht.

- Maher, B., Moore, C., & Matzka, J. (2008). Spatial variation in vehicle-derived metal pollution identified by magnetic and elemental analysis of roadside tree leaves. *Atmospheric Environment*, 42, 364-373.
- Marié, D., Chaparro, M., Irurzun, M., Lavernia, J., Marinelli, C., Cepeda, R., . . . Castañeda Miranda, A. (2016). Magnetic mapping of air pollution in Tandil city (Argentina) using the lichen *Parmotrema pilosum* as biomonitor. *Atmospheric Pollution Research*, 513-520.
- Marié, D., Chaparro, M., Lavernia, J., Sinito, A., Castañeda Miranda, A., Gargiulo, J., . . . Böhnelt, H. (2018). Atmospheric pollution assessed by in situ measurement of magnetic susceptibility on lichens. *Ecological Indicators*, 95, 831-840.
- Matzka, J., & Maher, B. (1999). Magnetic biomonitoring of roadside tree leaves: identification of spatial and temporal variations in vehicle-derived particulates. *Atmospheric Environment*, 33, 4565-4569.
- Mitchell, R., & Maher, B. (2009). Evaluation and application of biomagnetic monitoring of traffic-derived particulate pollution. *Atmospheric Environment*, 2095-2103.
- Mitchell, R., Maher, B., & Kinnersley, R. (2010). Rates of particulate pollution deposition onto leaf surfaces: Temporal and inter-species magnetic analyses. *Environmental Pollution*, 1472-1478.
- Muhammad, S., Wuyts, K., & Samson, R. (2019). Atmospheric net particle accumulation on 96 plant species with contrasting morphological and anatomical leaf characteristics in a common garden experiment. *Atmospheric Environment*, 328-344.
- Municipio de Querétaro. (2016). *Municipio de Querétaro. Resumen: Plan Estratégico de Movilidad 2026*. Querétaro.
- Obregón Biosca, S., Navarro Rosas, A., Montoya Zamora, R., De la Llata Gómez, R., & Ríos Núñez, M. (2020). Capítulo XIII Movilidad Humana y Propogación SARS-CoV-2. El Nuevo Paradigma. En Universidad Autónoma de Querétaro, *Análisis y perspectivas sobre la pandemia de COVID-19 en Querétaro*. Santiago de Querétaro, México.
- Ochoa-Ramírez, J., Lamy, B., & Serrano-Sánchez, Á. (2019). Migración interna y sus efectos en el crecimiento urbano del municipio de Querétaro. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 49-61.
- Presidencia Municipal de Querétaro. (2018). *Recuperación de la Alameda Hidalgo*. Querétaro.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2018). *Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016*. Ciudad de México: Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventario de Emisiones.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2020). *Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2018*. Dirección General de Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire.

UNEP. United Nations Environment Programme. (2016). Medio Ambiente Sano, Personas Sanas. Resumen ejecutivo. Nairobi.

Wang, Q., & Li, S. (2021). Nonlinear impact of COVID-19 on pollutions – Evidence from Wuhan, New York, Milan, Madrid, Bandra, London, Tokyo and Mexico City. *Sustainable Cities and Society*.

ZH Instruments. (2008). Magnetic susceptibility meter SM-30 User's Manual. Czech Republic.

ZH instruments. (2016). *SM 30 Shirt Pocket-size magnetic susceptibility meter*. Obtenido de http://www.zhinstruments.com/sm_30.html