Revista Mexicana de Ciencias Forestales Vol. 17 (95)
Mayo - Junio (2026)

DOI: 10.29298/rmcf.v17i95.1617

Artículo de investigación

Concentración de metales en hojas, nutrición y crecimiento de Fraxinus uhdei (Wenz.) Lingelsh. en bosques urbanos

Leaf metal concentrations, nutrient status and growth of Fraxinus uhdei (Wenz.) Lingelsh. in urban forests

Luz Amelia Sánchez-Landero[1], Griselda Benítez-Badillo[2], Wendy Sangabriel Conde[1], Julio César Pérez Hernández[3], Gustavo Ortiz Hernández[1], Gerardo Alvarado-Castillo[1], Elio Guarionex Lagunes-Díaz[2]*

Fecha de recepción/Reception date: 5 de diciembre de 2025.
Fecha de aceptación/Acceptance date: 23 de abril de 2026.

[1]Facultad de Ciencias Agrícolas campus Xalapa, Universidad Veracruzana. México.
[2]Red de Ambiente y Sustentabilidad, Instituto de Ecología, A. C. (Inecol). México.
[3]Centro de Investigaciones Tropicales. México

*Autor para correspondencia; correo-e: elio.lagunes@inecol.mx
*Corresponding author; e-mail: elio.lagunes@inecol.mx

Resumen

La contaminación atmosférica urbana ejerce presión crónica sobre el arbolado, debido al depósito de contaminantes generados por actividades antropogénicas, entre ellos metales asociados a emisiones vehiculares e industriales que pueden alterar procesos fisiológicos y afectar el crecimiento vegetal. Aunque la acumulación foliar de metales se ha utilizado como herramienta de biomonitoreo, aún existen vacíos en la compresión de su relación con cambios morfológicos y de crecimiento en especies urbanas dominantes. En este contexto, en el presente estudio se evaluó la concentración de metales en la superficie foliar y la fracción absorbida por el tejido, así como el contenido de nutrimentos en hojas de fresno (*Fraxinus uhdei*), especie ampliamente distribuida en bosques urbanos de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). El análisis se realizó en tres bosques urbanos con entornos contrastantes. Se determinaron las concentraciones de metales superficiales y absorbidos, y el contenido de nutrimentos, evaluando su asociación con variables morfológicas y de crecimiento mediante regresión lineal múltiple (método *stepwise*) y análisis vectorial nutrimental. Los resultados mostraron que el cobre (superficial y absorbido) se asoció positivamente con el incremento del área foliar, mientras que metales de origen antrópico como plomo, cadmio y cromo se relacionaron negativamente con el incremento del diámetro. El análisis nutrimental evidenció relaciones negativas entre la biomasa foliar y las concentraciones de nutrimentos. Estos hallazgos indican que la acumulación foliar de metales puede influir en la fisiología y nutrición del arbolado urbano y aportan bases para su monitoreo y manejo.

Palabras claves: Absorción de metales, biomasa foliar, biomonitoreo foliar, bosques urbanos, metales traza, nutrición vegetal.

Abstract

Urban air pollution places chronic stress on trees through the deposition of pollutants from human activities, including metals associated with vehicle and industrial emissions, which can disrupt physiological processes and affect plant growth. Although metal accumulation in leaves has been used as a biomonitoring tool, gaps remain in the understanding of its relationship to morphological and growth changes in dominant urban species. Within this context, the present study evaluated the concentration of metals on the leaf surface and the fraction absorbed by the tissue, as well as the nutrient content in the leaves of the ash tree (*Fraxinus uhdei*), a species widely distributed in urban forests in the Mexico City Metropolitan Area (*ZMVM* in Spanish). The analysis was conducted in three urban forests with contrasting environments. The concentrations of surface and absorbed metals and the nutrient content were determined, and their associations with morphological and growth variables were evaluated using multiple linear regression (stepwise method) and nutrient vector analysis. The results showed that copper (both surface and absorbed) was positively associated with increased leaf area, whereas metals of anthropogenic origin, such as lead, cadmium and chromium were negatively associated with increased diameter. The nutritional analysis revealed negative correlations between leaf biomass and nutrient concentrations. These findings suggest that the accumulation of metals in tree foliage may influence the physiology and nutrition of urban trees and provide a basis for their monitoring and management.

Keywords: Metal uptake, leaf biomass, leaf biomonitoring, urban forests, trace metals, plant nutrition.

Introducción

La contaminación atmosférica constituye una de las principales presiones ambientales en las megaciudades, donde las emisiones del tránsito vehicular, la actividad industrial y otras fuentes urbanas generan altas concentraciones de material particulado y metales traza (Molina & Molina, 2004). En este contexto, la vegetación urbana desempeña un papel relevante al interceptar y retener contaminantes en las superficies foliares, lo que contribuye a disminuir partículas suspendidas como PM_{10}, $PM_{2.5}$ y PM_{1}, las cuales transportan metales; y con ello, se mejora la calidad del aire (Lindén et al., 2023). Sin embargo, esta función implica una exposición continua a elementos tóxicos que pueden depositarse e ingresar al tejido vegetal, alterando procesos fisiológicos como la fotosíntesis, el balance nutrimental y el crecimiento del arbolado urbano (Kabata-Pendias, 2010; Bierza & Bierza, 2024).

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), las emisiones vehiculares e industriales constituyen fuentes importantes de metales traza en la atmósfera urbana (Molina & Molina, 2004). En particular, el transporte aporta más de 50 % de las emisiones totales de contaminantes atmosféricos (Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México [Sedema], 2023). Estudios recientes han documentado la acumulación de metales traza en el follaje del arbolado urbano (Fonseca-Salazar et al., 2023; Sánchez-Landero et al., 2024), que evidencian la exposición directa de especies a estos. Sin embargo, varios de esos estudios se han centrado en cuantificar la acumulación de metales, mientras que aún es limitado el conocimiento sobre sus implicaciones en la morfología foliar, el estado nutrimental y el crecimiento del arbolado urbano.

Este vacío es relevante en especies dominantes utilizadas en áreas verdes urbanas de la ZMVM como *Fraxinus* (Benavides-Meza et al., 2002), el cual se ha citado como relativamente tolerante a la contaminación atmosférica (Catinon et al., 2008). Por ello, el presente estudio analizó las concentraciones superficiales y absorbidas de metales y nutrimentos en hojas de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh. en tres bosques urbanos de la ZMVM, con distintos grados de presión urbana. Asimismo, se examinó su relación con variables morfológicas foliares: área foliar, área foliar específica y peso seco del follaje; así como con el incremento del diámetro a la altura del pecho (*DAP*), a fin de aportar evidencia sobre los efectos de la contaminación atmosférica en el funcionamiento y crecimiento del arbolado urbano.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en tres bosques urbanos de la ZMVM con distintos contextos de presión antropogénica: (1) Parque Naucalli (19°29’27.6” N, 99°14’21.2” O) al norte de la ZMVM, caracterizado por actividad industrial; (2) Primera Sección del Bosque de Chapultepec (19°23’40” N, 99°10’40” O), en la zona central con alto flujo vehicular; y (3) Bosque de Tlalpan (19°17’38.2” N, 99°11’36.3” O), al sur, con mayor cobertura arbórea y menor densidad urbana (Figura 1). Los sitios se seleccionaron por la presencia de *Fraxinus uhdei* y por representar un gradiente espacial de presión antrópica en áreas verdes urbanas de la ZMVM.

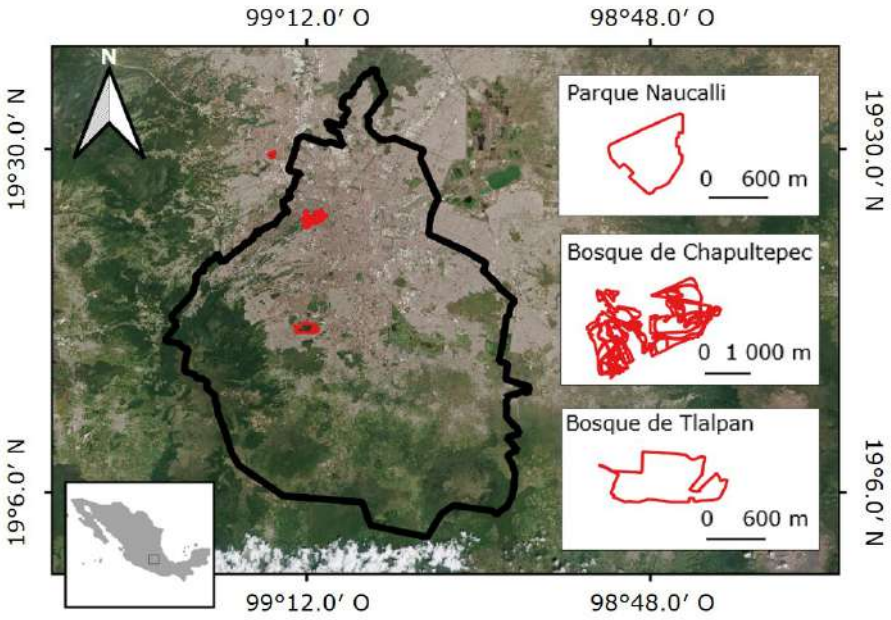


Figura 1. Ubicación de las áreas de estudio.

Muestreo y recolectas

Por bosque se estableció un transecto lineal de ~750 m, en el que se consideraron restricciones urbanas como infraestructura, áreas deportivas o zonas de acceso limitado. Se aplicó un muestreo sistemático con punto inicial aleatorio, seleccionando un árbol adulto y aparentemente sano de *F. uhdei*, cada 50 m hasta completar 15 individuos por sitio (*n* total=45 árboles). Cuando existían varios individuos elegibles en el punto de muestreo (±8 m, precisión del GPS) se seleccionó uno mediante aleatorización simple (tómbola); en áreas inaccesibles, se eligió el árbol más cercano manteniendo el intervalo espacial.

Se recolectaron hojas del dosel a una altura de 7 m durante las cuatro estaciones del año para determinar concentraciones foliares superficial y absorbida de metales y nutrimentos. El crecimiento se estimó mediante el incremento del diámetro a la altura del pecho (*DAP*), medido durante tres años consecutivos con cinta diamétrica *Forestry Suppliers Tape*® 320 cm (precisión de ±1 mm). El *pH* del suelo se determinó por árbol a 30 cm de profundidad, en los meses de abril, junio y septiembre con un potenciómetro *Hanna*® modelo pH 210, conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, método AS-02 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2002), lo anterior debido a su influencia en la disponibilidad y movilidad de metales y nutrimentos en el sistema suelo-planta.

Determinación del área foliar y área foliar específica

El área foliar (*AF*) se determinó en 100 hojas por árbol mediante un medidor *LI-COR*® Li-3100C, de manera constante en todos los individuos y sitios. Las hojas se recolectaron del tercio medio del dosel, fueron hojas maduras sin daño visible, para estandarizar el estado fisiológico y minimizar efectos asociados a la edad o posición en la copa. Posteriormente, se secaron a 75 °C hasta peso constante (estufa de

secado marca *Felisa*®, modelo FE-291), y se calculó el área foliar específica (*AFE*) con base en lo sugerido por Pérez-Harguindeguy et al. (2013).

$$AFE = \frac{AF}{PS}$$

Donde:

AFE= Área foliar específica ($cm^2\ g^{-1}$)

AF = Área foliar calculada para 100 hojas (cm^2)

PS = Peso seco de las 100 hojas (g)

Determinación de metales y nutrimentos en hojas

La concentración de metales (*Cu*, *Zn*, *Pb*, *Ni*, *Cr*, *Co* y *Cd*), se determinó en 20 g de hojas por árbol, cada árbol constituyó una unidad muestral. La fracción superficial de metales se obtuvo mediante lavado con una solución desorbente de EDTA disódico (ácido etilendiaminotetraacético disódico; Na_2EDTA marca *J. T. Baker*®, EE. UU.; (relación molar Plomo EDTA=0.12) (Olguín et al., 2005). A continuación, las hojas se enjuagaron con agua desionizada y las soluciones resultantes se analizaron con espectrometría de plasma acoplado inductivamente (ICP), marca *PerkinElmer*® modelo 3000. Para determinar la concentración absorbida, las hojas lavadas se secaron a 75 °C hasta peso constante (estufa de secado marca *Felisa*®, modelo FE-291), se pulverizaron en un molino marca *GI*® y se tamizaron a 2 mm. Enseguida, 0.25 g del material se digirieron con 6 mL de ácido nítrico (HNO_3) en digestor tipo

microondas, se aforaron a 25 mL con agua desionizada, se filtraron con papel *Whatman*® sin cenizas Núm. 45 y se analizaron mediante ICP.

Las concentraciones de fósforo (*P*) y potasio (*K*) se determinaron en el material foliar utilizado para metales absorbidos; para ello, se empleó el mismo procedimiento de digestión y análisis ICP. El nitrógeno (*N*) se cuantificó en dicho material vegetal mediante el método de micro-*Kjeldahl*, de acuerdo con la *Association of Official Analytical Chemists International* (Wendt-Thiex, 2023).

Análisis estadístico

Las diferencias entre bosques en *AF*, *AFE*, peso seco de las hojas (*PS*) e incremento del *DAP* se evaluaron mediante *Kruskal-Wallis* y *Mood-Median* al 95 % de confianza. La unidad muestral fue el árbol (n=15 por sitio). Previamente, se verificaron los supuestos de normalidad (*Shapiro-Wilk*) y homogeneidad de varianzas (*Levene*); al no cumplirse, se aplicaron pruebas no paramétricas.

El efecto de los metales (superficiales y absorbidos), nutrimentos y *pH* del suelo sobre las variables morfológicas foliares y el incremento del *DAP* se evaluó mediante regresión lineal múltiple. Como variables dependientes se consideraron *AF*, *AFE*, *PS* e incremento del *DAP*, y como predictoras las concentraciones de metales, nutrimentos (*N*, *P* y *K*) y el *pH* del suelo. Los análisis se realizaron considerando el sitio y las cuatro estaciones del año. La selección de variables se hizo con el procedimiento *stepwise* con *forward selection* y *backward elimination*, para identificar los predictores con más capacidad explicativa. Los modelos finales se eligieron con base en el mayor Coeficiente de determinación (R^2 ajustado) y significancia (α=0.05), previa evaluación de la colinealidad mediante el factor de inflación de la varianza (*VIF*). Los análisis se efectuaron en *MINITAB*® versión 14 (Minitab Inc., 2004). Finalmente, el balance nutrimental de *N*, *P* y *K* se evaluó mediante nomogramas vectoriales, de acuerdo con López-López y Alvarado-López (2010).

Resultados y Discusión

Variables morfométricas: diferencia entre sitios

La prueba de *Kruskall-Wallis* mostró diferencias significativas entre sitios para el *AFE* y en el incremento del *DAP* (Cuadro 1). La *AFE* presentó la mediana más alta en el Bosque de Tlalpan, lo cual podría asociarse con su ubicación en una zona menos perturbada. En ambientes con menor grado de disturbio, la disponibilidad de recursos aumenta (agua, luz y nutrientes), lo que favorece una mayor *AFE* y por consecuencia tasas crecimiento arbóreo superiores (Poorter et al., 2009). El valor más alto para el incremento del *DAP*, se registró en el Parque Naucalli, ello evidenció variación en la tasa de crecimiento del arbolado entre sitios. En la literatura se señala que factores locales como las características del suelo, manejo del sitio o la historia de establecimiento pueden influir en el crecimiento de árboles en ambientes urbanos (Pretzsch et al., 2017). Sin embargo, estas variables no fueron evaluadas en este estudio, por lo que las diferencias deben interpretarse únicamente como variación entre sitios.

Cuadro 1. Comparación de medianas para las variables *AF*, *AFE*, *PS* y *DAP*.

Variable	Naucalli M_e	Chapultepec M_e	Tlalpan M_e	Valor *p*
AF	2 065	2 595	2 539	0.140
AFE	56.1[b]	66.6[b]	78.7[a]	0.001
PS	34.90	33.67	29.19	0.105
DAP	1.20[a]	0.50[b]	0.50[b]	0.002

AF = Área foliar; *AFE* = Área foliar específica; *PS* = Peso seco; *DAP* = Incremento del *DAP*; M_e = Mediana. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas entre sitios de acuerdo con la prueba de *Kruskal-Wallis*.

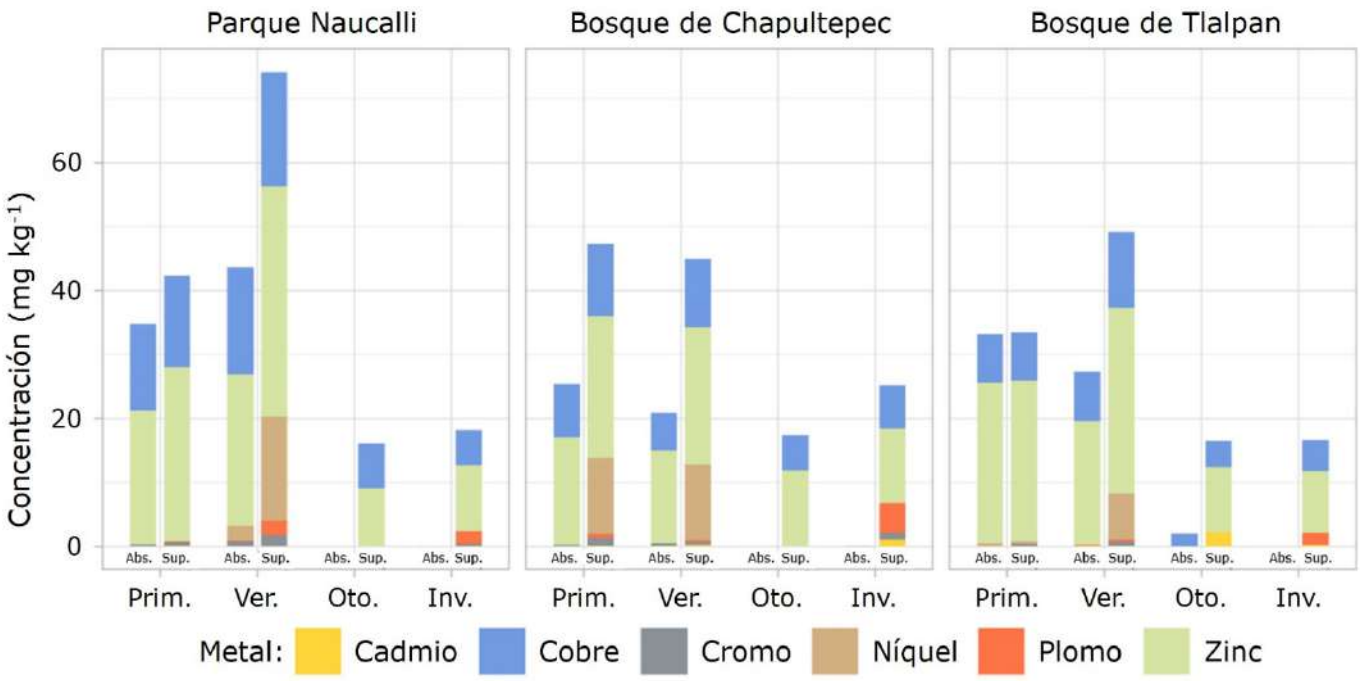
Concentraciones de *Cu*, *Zn*, *Pb*, *Ni*, *Cr* y *Cd*

Las concentraciones promedio superficiales y absorbidas por el tejido foliar de *Cu*, *Zn*, *Pb*, *Ni*, *Cr* y *Cd* en hojas de *Fraxinus uhdei* por sitio y estación se presentan en el Cuadro 2. En los tres sitios, *Cu* y *Zn* registraron las concentraciones más altas tanto en la fracción superficial como en la absorbida, mientras que *Ni* presentó los valores más bajos. *Cr*, *Cd* y *Pb* se detectaron en concentraciones menores, aunque de manera constante en el follaje de *F. uhdei* (Figura 2). Las concentraciones más altas se observaron en primavera y verano, lo que sugiere mayor acumulación durante la temporada de crecimiento, cuando el desarrollo foliar favorece la interceptación de partículas atmosféricas sobre la vegetación urbana (Lindén et al., 2023).

Cuadro 2. Concentraciones promedio superficiales y absorbidas de *Cu*, *Zn*, *Pb*, *Ni*, *Cr* y *Cd* en hojas de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh. por sitio y estación del año.

Bosque	Metal	Primavera		Verano		Otoño		Invierno	
		Sup.	Abs.	Sup.	Abs.	Sup.	Abs.	Sup.	Abs.
PN	*Cu*	14.3±6.1	13.6±5.8	17.90±7.7	16.7±7.3	7.1±3.6	0.004±0.001	5.5±2.0	0.01±0.01
	Zn	27.1±9.4	20.9±6.1	36.0±14.7	23.6±8.1	8.98±2.35	0.01±0.01	10.30±2.8	0.02±0.01
	Pb	0.2±0.16	N/d	2.23±2.25	0.04±0.01	0.05±0.01	0.001±0.001	1.98±2.5	0.01±0.001
	Ni	N/d	N/d	16.4±11.3	2.3±0.6	0.01±0.01	0.002±0.001	0.002±0.001	0.01±0.001
	Cr	0.52±0.23	0.2±0.17	1.66±1.21	0.84±0.57	0.001±0.001	0.001±0.00	0.28±0.61	0.01±0.001
	Cd	0.1±0.04	0.1±0.26	0.05±0.05	0.02±0.02	0.006±0.002	0.001±0.001	0.07±0.02	0.001±0.001
BC	*Cu*	11.37±6.5	8.32±6.01	10.6±5.07	5.96±1.91	5.52±3.03	0.01±0.01	6.79±3.26	0.02±0.02
	Zn	22.1±10.1	16.82±8.6	21.5±7.83	14.5±2.56	11.85±3.30	0.02±0.01	11.66±4.49	0.04±0.03
	Pb	0.58±0.53	N/d	0.26±0.27	N/d	0.01±0.01	0.01±0.01	4.69±4.34	0.01±0.01
	Ni	102.0±1.6	N/d	11.8±10.2	N/d	0.01±0.01	0.001±0.001	0.01±0.01	0.01±0.001
	Cr	1.17±1.07	0.19±0.19	0.53±0.27	0.34±0.02	0.01±0.01	0.01±0.001	1.0±0.6	0.001±0.001
	Cd	0.15±0.08	0.05±0.02	0.21±0.03	0.12±0.13	0.01±0.01	0.001±0.001	1.1±0.2	0.01±0.01
BT	*Cu*	7.59±3.79	7.59±3.79	11.8±6.76	7.8±4.0	4.17±1.05	0.02±0.01	4.77±1.96	0.01±0.001
	Zn	25.1±7.4	25.1±7.4	29.1±6.74	19.4±5.3	10.19±2.66	0.01±0.01	9.74±4.10	0.02±0.01
	Pb	N/d	N/d	0.42±0.42	0.10±0.01	0.001±0.01	0.001±0.001	1.8±2.7	0.01±0.001
	Ni	0.45±0.01	0.5±0.02	7.1±3.7	N/d	0.01±0.01	0.01±0.001	0.001±0.01	0.001±0.001
	Cr	0.32±0.01	N/d	0.57±0.52	N/d	0.001±0.001	0.001±0.001	0.07±0.10	0.01±0.001
	Cd	0.06±0.03	0.06±0.03	0.14±0.05	0.09±0.04	2.18±0.50	0.01±0.01	0.18±0.01	0.01±0.001

PN = Parque Naucalli; BC = Bosque de Chapultepec; BT = Bosque de Tlalpan. Sup. = Superficial; Abs. = Absorbido. *Cu* = Cobre; *Zn* = Zinc; *Pb* = Plomo; *Ni* = Níquel; *Cr* = Cromo; *Cd* = Cadmio; N/d = No determinado; ± es la desviación estándar. Las concentraciones se expresan en mg kg^{-1}.



Abs. = Absorbido; Sup. = Superficial. Prim. = Primavera; Ver. = Verano; Oto. = Otoño; Inv. = Invierno.

Figura 2. Concentraciones promedio superficiales y absorbidas de *Cd*, *Cu*, *Cr*, *Ni*, *Pb* y *Zn* en hojas de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh. por época estacional.

La fracción superficial se asocia con el depósito de contaminantes atmosféricos sobre las hojas, mientras que la absorbida refleja la incorporación y traslocación de estos elementos en los tejidos vegetales. Este patrón se ha documentado en árboles urbanos usados como bioindicadores de contaminación, donde *Cu* y *Zn* suelen tener concentraciones relativamente altas (3-14 mg kg^{-1} y 20-90 mg kg^{-1}, respectivamente) por su relación con emisiones vehiculares, desgaste de frenos y otras fuentes urbanas (Rai, 2016; Youssef, 2020). Las diferencias entre fracciones sugieren que *F. uhdei* puede acumular metales tanto por depósito superficial, como por incorporación a los tejidos foliares. Sin embargo, la magnitud de estos procesos varía entre sitios y estaciones del año en función de factores como la intensidad del tráfico, las condiciones ambientales y las características fisiológicas del arbolado (Soba et al., 2022).

Relaciones entre metales, nutrimentos, variables foliares y de crecimiento

Los modelos de regresión múltiple identificaron asociaciones entre las concentraciones de metales en el follaje (superficial y absorbida), nutrimentos y *pH* del suelo con variables de crecimiento de *Fraxinus uhdei* (*AF*, *AFE*, *PS* e incremento del *DAP*) (Cuadro 3). Estas relaciones variaron entre sitios y estaciones del año. En los bosques de Chapultepec y Tlalpan las asociaciones se observaron principalmente para el *AF* y *PS* en primavera, otoño e invierno, así como para el *DAP* en verano e invierno. Patrón que coincide con la dinámica estacional de crecimiento arbóreo, ya que en primavera ocurre la expansión foliar, y en verano aumenta la actividad asociada al crecimiento radial (Varela et al., 2023), mientras que en otoño e invierno las condiciones atmosféricas urbanas favorecen la acumulación de contaminantes a causa de las inversiones térmicas y una menor precipitación, lo cual aumenta el depósito de metales en el follaje (Molina & Molina, 2004).

Cuadro 3. Variable respuesta para el área foliar (*AF*), área foliar específica (*AFE*), diámetro a la atura del pecho (*DAP*) y peso seco del follaje (*PS*) por sitio y estación del año con valores de significancia (*p*) y el Coeficiente de correlación (R^2 ajustado).

Variable respuesta	Sitio	Estación	Predictores positivos	Predictores negativos	Valor *p*	R^2 ajustado (%)
AF	BC	Primavera	*Cu* y *Cd* absorbido, *Zn* superficial y *pH* del suelo	*Cu* superficial y *Zn* absorbido	0.013	72.7
		Otoño	*pH* del suelo	*Cd* absorbido y *Zn* superficial	0.002	66.9
	BT		*Ni* superficial, *Cu* superficial y absorbido y *K* superficial	*Cr* y *P* superficiales y *Cd* absorbido	0.011	79.2
AFE	PN	Primavera	-------	*Cr* absorbido y superficial y *N*	0.003	62.6
		Invierno	-------	*P* superficial y absorbido	0.001	67.1
DAP	BC	Verano	-------	*pH* del suelo y *Cd* absorbido y superficial	0.005	58
		Invierno	*Cr* absorbido	*K* y *Ni* absorbido; *Cd* superficial	0.001	85.3
	BT	Invierno	*Cr* absorbido y *Cu* superficial	*Cd* y *Pb* superficial; *Cu* absorbido; *Ni* superficial y *N*	0.001	99.6
	PN	Primavera	-------	*Cr* absorbido	0.001	65.5
PS	BC	Primavera	*Zn* superficial	*Cu* y *Cr* superficial	0.001	83.8

AF = Área foliar; *AFE* = Área foliar específica; *PS* = Peso seco; *DAP* = Incremento del *DAP*. BC = Bosque de Chapultepec; BT = Bosque de Tlalpan; PN = Parque Naucalli.

En el Parque Naucalli, las relaciones se observaron principalmente para el *AFE* y el incremento del *DAP* en primavera e invierno, lo que sugiere un patrón estacional relacionado con la disponibilidad de recursos y el estrés ambiental. En este contexto, el arbolado urbano puede actuar como indicador sensible de las presiones derivadas de las actividades urbanas (Patel et al., 2023). En conjunto, los resultados indican que la interacción entre metales, nutrimentos y *pH* del suelo contribuye a explicar parte de los rasgos foliares y el crecimiento de *F. uhdei*; aunque su efecto depende de las condiciones ambientales y del grado de presión urbana de cada sitio (Omidi et al., 2025).

Relaciones con el área foliar

El área foliar (*AF*) mostró relaciones con metales y el *pH* de suelo en los bosques Chapultepec y Tlalpan (Cuadro 3), con variaciones estacionales, pero patrones consistentes. En Chapultepec, durante primavera el *AF* se relacionó positivamente con el cobre absorbido, zinc superficial y *pH* del suelo (esto indica que las variables la aumentan) y negativamente con el cobre superficial y zinc absorbido (afectan la producción de follaje). En Tlalpan, el *AF* presentó asociaciones positivas con *pH* del suelo en otoño y con cobre, níquel y potasio en invierno, mientras que cromo, fósforo y cadmio se asociaron negativamente. En conjunto *pH* del suelo y elementos como *Cu*, *Zn* y *Ni* (que son nutrimentos para las plantas) mostraron efectos positivos recurrentes, mientras que metales de origen antropogénico como *Cd* y *Cr* se asociaron con la reducción de *AF*. Por otro lado, el efecto positivo del cobre absorbido es coherente con su papel como nutriente esencial, y el cobre superficial podría reflejar su acumulación, afectando procesos foliares (Alcántar-González et al., 2016; Rai, 2016). Asimismo, el efecto positivo del *pH* en los sitios indicó un papel importante en la regulación de la disponibilidad de nutrimentos y metales en el sistema suelo-planta (Kabata-Pendias, 2010).

Relaciones con el área foliar específica

El área foliar específica (*AFE*) estuvo asociada con distintos elementos en el Parque Naucalli, en primavera se observó una relación negativa con el cromo superficial y absorbido y con nitrógeno foliar; en invierno el fósforo superficial y el absorbido tuvieron una asociación negativa. Las concentraciones promedio de cromo registradas (0.52 mg kg^{-1} superficial y 0.21 mg kg^{-1} absorbido) fueron inferiores a las citadas en otros estudios de vegetación urbana y que están por debajo de los niveles

considerados tóxicos para las plantas (Kabata-Pendias, 2010; Ramírez-Méndez et al., 2021). No obstante, su asociación negativa con el *AFE* sugiere que concentraciones bajas de este metal pueden ocasionar cambios en los rasgos foliares.

En cuanto al nitrógeno, la concentración promedio observada (0.97 %) fue inferior al nivel mínimo generalmente requerido para el crecimiento vegetal (≈1.5 %) (Alcántar-González et al., 2016). Esta condición podría generar un desbalance en la relación *N*:*P* que originaría menor capacidad de formación de tejido foliar, lo que potencialmente contribuiría a la reducción del *AFE* observada en primavera e invierno. Los resultados indican que tanto la presencia de metales, como la disponibilidad de nutrientes influyen en la variación del *AFE* en ambientes urbanos, y resaltan nuevamente los efectos de elementos como el *Cr* que puede afectar la estructura y funcionalidad del follaje.

Relaciones con el incremento en el *DAP*

El incremento del diámetro a la altura del pecho (*DAP*) presentó asociaciones con distintos metales y el *pH* del suelo en los tres sitios y por estaciones. En Chapultepec, durante verano e invierno, el cadmio tanto superficial como absorbido se asoció negativamente con el incremento del *DAP*. En el invierno, el *DAP* en Tlalpan se relacionó negativamente con el cadmio y plomo superficiales. Para el Parque Naucalli en primavera se observó una asociación negativa entre el *DAP* y el cromo absorbido.

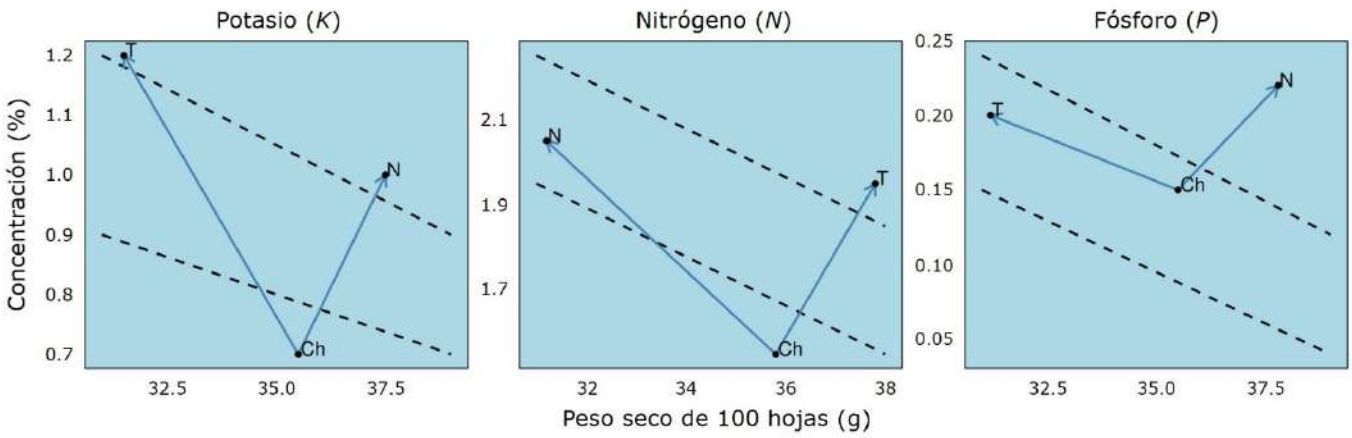
Estos resultados sugieren que la presencia de metales potencialmente tóxicos y de origen antropogénico se asocia con una menor tasa de crecimiento radial de *F. uhdei*, particularmente en periodos invernales cuando hay reducción de la precipitación. Aunque las concentraciones de cadmio registrados en este estudio se mantuvieron por debajo de los niveles considerados tóxicos para las plantas (3-5 mg kg^{-1}) (Kabata-Pendias, 2010); puede acumularse en tejidos vegetales y afectar procesos fisiológicos como la transpiración y la fotosíntesis (Bierza & Bierza, 2024), lo que contribuiría a explicar su asociación negativa con el incremento del *DAP*

Relaciones con el peso seco de las hojas

El peso seco de las hojas (*PS*) en el Bosque de Chapultepec durante la primavera se relacionó positivamente con el zinc superficial y de manera negativa con el cobre y el cromo superficiales. El efecto positivo del zinc coincide con su función como nutriente esencial involucrado en la estabilidad de proteínas y en procesos metabólicos de las plantas (Alcántar-González et al., 2016). En contraste, la asociación negativa del cobre y el cromo sugiere que su depósito se vincularía con una menor acumulación de biomasa foliar.

Concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio

Los análisis de vectores (Figura 3A-C) mostraron diferencias negativas entre el peso seco de 100 hojas y la concentración foliar de *N*, *P* y *K*, lo que indica un posible efecto de dilución nutrimental asociado al incremento de la biomasa foliar. Esa tendencia fue más evidente en *K*, mientras que *N* y *P* registraron variaciones más moderadas. Los resultados coinciden con lo señalado para rasgos funcionales foliares, ya que el aumento de biomasa o cambios en la estructura de la hoja modifican la concentración relativa de nutrientes, sin que se presenten limitaciones nutricionales (Binkley et al., 2025). Asimismo, las características morfológicas y fisiológicas de las hojas pueden influir en la captura, retención y acumulación de elementos presentes en la atmósfera.



N = Parque Naucalli; Ch = Bosque de Chapultepec; T = Bosque de Tlalpan.

Figura 3. Nomogramas de análisis de vectores para diagnóstico nutrimental.

Conclusiones

Los resultados evidencian diferencias entre sitios urbanos en rasgos foliares y de crecimiento de *Fraxinus uhdei*, particularmente en el área foliar específica (*AFE*) y en el incremento del diámetro a la altura del pecho (*DAP*), lo que refleja variabilidad en la respuesta del arbolado bajo distintas condiciones urbanas. En el follaje se registró la presencia de metales tanto en la fracción superficial como en la absorbida con mayores concentraciones de *Cu* y *Zn* y menores de *Ni*, *Cr*, *Cd* y *Pb*, lo que indica que las hojas integran procesos de depósito atmosférico y absorción de elementos presentes en el ambiente urbano.

Los modelos de regresión mostraron asociaciones entre metales, nutrimentos y el *pH* del suelo con variables foliares de crecimiento (*AF*, *AFE*, *PS* y *DAP*), lo que evidencia que la interacción entre estos factores contribuye a explicar parte de la variación en el desempeño del arbolado. En conjunto, los resultados demuestran que los rasgos foliares y el crecimiento de *F. uhdei* en ambientes urbanos está asociado con la

interacción de metales presente en el ambiente, la disponibilidad de nutrimentos y las condiciones del *pH* del suelo. Estos hallazgos proporcionan información sobre los factores que afectan la salud y el crecimiento de los árboles de fresno en entornos urbanos, lo que puede guiar futuras investigaciones y acciones de manejo para mejorar la calidad del ambiente citadino y la resiliencia de la vegetación urbana frente a las presiones ambientales.

Agradecimientos

A la administración de los parques Naucalli, Chapultepec y Tlalpan, por las facilidades otorgadas para la colecta de follaje, así como a las autoridades correspondientes por los permisos brindados.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Luz Amelia Sánchez-Landero: diseño experimental y estadístico, redacción y atención de revisiones; Griselda Benítez-Badillo: curatoría de datos; Wendy Sangabriel Conde: análisis formal, revisión del borrador; Julio César Pérez Hernández: diseño estadístico, gráficas y atención de revisiones; Gustavo Ortiz Hernández: redacción, análisis estadístico; Gerardo Alvarado-Castillo: diseño metodología; Elio Guarionex Lagunes-Díaz: objetivos, diseño metodológico, redacción y atención de revisiones.

Referencias

Alcántar-González, G., Trejo-Téllez, L. I., & Gómez-Merino, F. C. (2016). *Nutrición de cultivos*. Colegio de Postgraduados. https://books.google.com.mx/books/about/Nutrici%C3%B3n_de_cultivos.html?id=TaP3vQEACAAJ&redir_esc=y

Benavides-Meza, H. M., López-Martínez, R., & Flores-Hernández, J. (2002). Daños a banquetas por arbolado de alineación establecido en cepas en la delegación Coyoacán, Distrito Federal. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *27*(92), 53-77. https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/902

Bierza, K., & Bierza, W. (2024). The effect of industrial and urban dust pollution on the ecophysiology and leaf element concentration of *Tilia cordata* Mill. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*, 58413–58429. https://doi.org/10.1007/s11356-024-34999-9

Binkley, D., Stape, J. L., & Albaugh, T. J. (2025). Foliar nutrient concentrations and stoichiometry should not be assumed to diagnose nutrient limitation. *Ecological Processes*, *14*, Article 27. https://doi.org/10.1186/s13717-025-00600-5

Catinon, M., Ayrault, S., Daudin, L., Sevin, L., Asta, J., Tissut, M., & Ravanel, P. (2008). Atmospheric inorganic contaminants and their distribution inside stem tissues of *Fraxinus excelsior* L. *Atmospheric Environment*, *42*(6), 1223-1238. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.082

Fonseca-Salazar, M. A., Sosa-Echeverría, R., Alarcón-Jiménez, A. L., & Sánchez-Álvarez, P. (2023). Chemical composition of wet atmospheric deposition in a natural urban reserve, conservation of green urban areas: Mexico City case study. *Water, Air & Soil Pollution*, *234*, Article 514. https://doi.org/10.1007/s11270-023-06502-6

Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b10158

Lindén, J., Gustafsson, M., Uddling, J., Watne, Å., & Pleijel, H. (2023). Air pollution removal through deposition on urban vegetation: The importance of vegetation characteristics. *Urban Forestry & Urban Greening*, *81*, Article 127843. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127843

López-López, M. Á., & Alvarado-López, J. (2010). Interpretación de nomogramas de análisis de vectores para diagnóstico nutrimental de especies forestales. *Madera y Bosques*, *16*(1), 99-108. https://doi.org/10.21829/myb.2010.1611182

Minitab Inc. (2004). *Minitab Statistical Software* (Version 14) [Computer software]. Minitab Inc. https://www.minitab.com/es-mx/support/downloads/

Molina, M. J., & Molina, L. T. (2004). Megacities and atmospheric pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *54*(6), 644-680. https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470936

Olguín, E. J., Sánchez-Galván, G., Pérez-Pérez, T., & Pérez-Orozco, A. (2005). Surface adsorption, intracellular accumulation and compartmentalization of Pb (II) in batch operated lagoons with *Salvinia minima* as affected by environmental conditions, EDTA and nutrients. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, *32*(11-12), 577-586. https://doi.org/10.1007/s10295-005-0250-1

Omidi, S., Teiri, H., Mohammadi, F., & Hajizadeh, Y. (2025). Accumulation of heavy metals in the leaves of different tree species and its association with the levels of atmospheric $PM_{2.5}$-bond heavy metals in Isfahan. *International Journal of Phytoremediation*, *27*(2), 260-270. https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2413414

Patel, K., Chaurasia, M., & Rao, K. S. (2023). Heavy metal accumulation in leaves of selected plant species in urban areas of Delhi. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*, 27622-27635. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24157-4

Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., de Vos, A. C., … Cornelissen, J. H. C. (2013). New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, *61*(3), 167-234. https://doi.org/10.1071/BT12225

Poorter, H., Niinemets, Ü., Poorter, L., Wright, I. J., & Villar, R. (2009). Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): A meta-analysis. *New Phytologist*, *182*(3), 565-588. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02830.x

Pretzsch, H., Biber, P., Uhl, E., Dahlhausen, J., Schütze, G., Perkins, D., Rötzer, T., Caldentey, J., Koike, T., van Con, T., Chavanne, A., du Toit, B., Foster, K., & Lefer, B. (2017). Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. *Scientific Reports*, *7*, Article 15403. https://doi.org/10.1038/s41598-017-14831-w

Rai, P. K. (2016). Impacts of particulate matter pollution on plants: implications for environmental biomonitoring. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *129*, 120-136. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.03.012

Ramírez-Méndez, E., Valdés-Reyna, J., Juárez-Maldonado, A., Martínez-Villegas, N. V., & López-Barbosa, L. A. (2021). Biomonitoreo de metales pesados en vegetación arbórea en la ciudad de Saltillo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (26), 191-199. https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2949

Sánchez-Landero, L. A., Benítez-Badillo, G., Sangabriel-Conde, W., Alvarado-Castillo, G., & Lagunes-Diaz, E. G. (2024). Surface deposits and intracellular concentration of atmospheric particles in foliage of urban forests in the Valley of Mexico. *Trees, Forests and People*, *15*, Article 100492. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100492

Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2023). *Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2020. Contaminantes criterio, tóxicos y gases y compuestos de efecto invernadero*. Gobierno de la Ciudad de México. https://proyectos.sedema.cdmx.gob.mx/datos/storage/app/media/docpub/sedema/inventario-emisiones-cdmx-2020bis.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. Diario Oficial de la Federación. https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf

Soba, D., Gámez, A. L., Becerril, J. M., Esteban, R., & Aranjuelo, I. (2022). Traffic restrictions during COVID-19 lockdown improve air quality and reduce metal biodeposition in tree leaves. *Urban Forestry & Urban Greening*, *70*, Article 127542. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127542

Varela, Z., Martínez-Abaigar, J., Tomás-Las-Heras, R., Fernández, J. Á., Del-Castillo-Alonso, M.-Á., & Núñez-Olivera, E. (2023). Tree physiological variables as a proxy of

heavy metal and platinum group elements pollution in urban areas. *Biology*, *12*(9), 1180. https://doi.org/10.3390/biology12091180

Wendt-Thiex, N. J. (Ed.). (2023). 4.2.08 AOAC Official Method 990.03 Protein (crude) in animal feed: Combustion method. In G. W. Latimer, Jr. (Ed.), *Official methods of analysis of AOAC International* (22nd ed., pp. 1-6.). Association of Official Analytical Chemists International Publications. https://doi.org/10.1093/9780197610145.003.1400

Youssef, N. A. (2020). Bioaccumulation of heavy metals in urban tree leaves. *Egyptian Journal of Botany*, *60*(1), 261-273. https://doi.org/10.21608/ejbo.2019.15219.1344

Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales –**sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0* Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional), que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.