

Distribución espacial de plomo en *Mangifera indica* and *Syzygium malaccense* en una ciudad intermedia, Colombia

Christian Valderrama ^I
Hernan Zarate ^{II}

Resumen: El desarrollo urbano descontrolado y el desplazamiento poblacional, ha incrementado la necesidad de diseñar estrategias que mitiguen la seguridad alimentaria en América Latina. Esta investigación caracterizó la presencia y distribución espacial de concentraciones de plomo (Pb) en especies de árboles frutales en las vías públicas en Neiva, Colombia. Se realizó un censo que identificó a *Mangifera indica* y *Syzygium malaccense* como las especies más prevalentes. Se recolectaron y analizaron muestras de frutas según estándares internacionales. Se emplearon métodos de interpolación espacial y Kriging para mapear las concentraciones de plomo en el paisaje urbano. Se encontraron niveles de plomo en todas las muestras, con cinco superando el límite permisible de 0.1 mg/kg. Las mayores concentraciones se observaron en áreas industriales. Estos hallazgos destacan la importancia de establecer estrategias de agroforestería urbana en áreas con bajos niveles de contaminación y se identifica la necesidad de futuras investigaciones que zonifiquen la agricultura urbana.

^I Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España

^{II} Universidad de Manizales, Manizales, Colombia

Palabras clave: Bosques alimentarios urbanos; Metales pesados; Paisajes comestibles; Servicios Ecosistemicos; Sostenibilidad.

São Paulo. Vol. 28, 2025

Artículo Original

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc0147vu28L4AE>

Introducción

En los entornos urbanos, los metales pesados provienen principalmente de fuentes antropogénicas. El tráfico vehicular, las plantas industriales y los incineradores liberan metales a la atmósfera, los cuales posteriormente se depositan en el suelo y son absorbidos por especies vegetales (SAWIDIS et al., 2011). El grado de absorción metálica depende de diversos factores, incluyendo la especie vegetal específica, el tipo de contaminante y su concentración (ALAHABADI et al., 2017). Entre los metales más estudiados debido a su toxicidad y prevalencia se encuentran el mercurio (Hg), el arsénico (As) y el plomo (Pb) (ALLOWAY, 2013). El monitoreo de estos contaminantes en áreas urbanas suele ser costoso y, en ocasiones, poco confiable, lo que ha llevado a preferir la evaluación de la respuesta de organismos vivos, como los árboles, que actúan como bioindicadores efectivos de la contaminación atmosférica (BOQUETE et al., 2014).

La forestería alimentaria urbana (Urban Food Forestry, UFF) ha cobrado gran relevancia como estrategia para apoyar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular la iniciativa Hambre Cero. En los últimos 20 años, la investigación en este campo ha crecido a una tasa del 13,8% (VALDERRAMA et al., 2023), contribuyendo al fortalecimiento de los espacios verdes urbanos y a la mejora de la calidad del aire (DOUGLAS; IRGA; TORPY, 2019; WARD et al., 2015; ZUPANCIC; WESTMACOTT; BULTHUIS, 2015). A pesar de sus beneficios, la UFF enfrenta desafíos relacionados con el riesgo de contaminación por metales pesados en áreas urbanas. Las plantas que crecen en estos entornos están expuestas a altas cargas de contaminantes, lo que puede ocasionar la bioacumulación de sustancias nocivas en frutos comestibles (MEHARG, 2016; SÄUMEL et al., 2012). Aunque existe un creciente interés en este enfoque, el paisajismo basado en árboles frutales sigue siendo limitado y no existen lineamientos estandarizados para producir frutos saludables en áreas urbanas (GORI; FERRINI; FINI, 2019).

Los avances recientes en geoestadística han mejorado notablemente el monitoreo de la contaminación ambiental, en particular mediante la aplicación de kriging para el análisis espacial y la predicción. El kriging se mantiene como una técnica destacada, al proporcionar predicciones lineales óptimas e insesgadas en ubicaciones no muestreadas, lo cual resulta crucial para evaluaciones ambientales precisas (OLIVER; WEBSTER, 2014; SRIVASTAVA, 2013). Métodos no lineales de kriging, como el lognormal y el kriging de indicadores, han demostrado ser especialmente efectivos para abordar tendencias de datos no gaussianos (ROUHANI, 1996). Asimismo, la modelación geoestadística ha sido fundamental en la evaluación de la contaminación del suelo asociada a la deposición atmosférica, permitiendo predicciones precisas de los niveles de contaminación con un mínimo de muestreo en campo, lo que reduce costos y aumenta la eficiencia (BORKOWSKI; KWIATKOWSKA-MALINA, 2017; HENSHAW et al., 2004). La integración de sistemas de información geográfica (SIG) con técnicas de kriging ha refinado aún más la precisión en la evaluación de la distribución espacial en ambientes urbanos, convirtiéndose en una herramienta indispensable para caracterizar la contaminación en áreas afectadas por actividades industriales (CHENG et al., 2009; NICKEL et al., 2017; WANG; XIE; LI, 2015).

En diversos contextos se han aplicado enfoques similares, como la combinación de kriging factorial y regresión paso a paso para identificar los factores ambientales que influyen en la distribución de metales pesados en suelos en Rizhao, China, donde el kriging reveló una variabilidad multiescalar y facilitó la evaluación ambiental (LV et al., 2013). Otro estudio empleó kriging para analizar la dependencia espacial de propiedades del suelo en áreas de marisma salobre, aportando información crítica para la gestión territorial y la mejora de la productividad agrícola (SIGUA; HUDNALL, 2008). De igual manera, el kriging por regresión se ha utilizado para incrementar la precisión en la predicción de propiedades del suelo en agricultura de precisión, integrando la correlación espacial de los residuos de regresión para mejorar significativamente la caracterización edáfica (YUFENG GE et al., 2007). Estos ejemplos resaltan la versatilidad del kriging en aplicaciones ambientales y agrícolas, evidenciando su valor en la predicción y gestión de la contaminación.

En este contexto, y considerando el creciente interés en los paisajes comestibles vinculados a la forestería urbana, la geoestadística —en particular el kriging— ofrece un gran potencial para abordar vacíos de conocimiento relacionados con la identificación, localización y predicción de sitios óptimos de cultivo urbano. Actualmente, existe una notoria escasez de investigaciones que utilicen esta tecnología para predecir y establecer áreas potenciales para la agricultura urbana. Por ejemplo, estudios en grandes ciudades como Nueva York han evaluado las capacidades de producción y las propiedades nutricionales de diversas especies de “berries y nueces” (BUNGE et al., 2019). En Berlín, se han determinado los contenidos de Pb y Cd en frutos urbanos (VON HOFFEN; SÄUMEL, 2014). En Chelyabinsk, se demostró que los metales y metaloides presentes en los frutos no representan riesgos para la salud si son adecuadamente lavados (KRUPNOVA et al., 2021). Investigaciones en ciudades intermedias del Congo han identificado el potencial de generación de frutos en viviendas (USENI et al., 2021). De forma similar, en ciudades como Sevilla, Palermo, Al Ain y Kastamonu se han analizado las concentraciones de metales en distintos frutos urbanos, asociando los niveles de contaminación a áreas específicas, como los naranjos (OLIVA; VALDÉS, 2003), las palmas datileras (AHMED; KAUR; HASSAN, 2022) y los manzanos (SEVIK et al., 2020). Por lo tanto, la aplicación de métodos geoestadísticos avanzados puede fortalecer significativamente el monitoreo ambiental y los procesos de toma de decisiones en contextos de agricultura urbana.

En América Latina, las ciudades intermedias (con poblaciones entre 50.000 y 1 millón de habitantes) funcionan como nodos críticos de conexión entre áreas rurales y urbanas, representando aproximadamente el 20% de la población mundial (IGLESIAS, 2016). Estas ciudades, como Neiva (Colombia), enfrentan desafíos y oportunidades particulares para implementar iniciativas de forestería urbana como estrategia para cerrar la brecha entre los sitios de producción y de consumo de alimentos (CASTRO et al., 2018). Dado que se proyecta que cerca del 90% de la población en América Latina y el Caribe vivirá en zonas urbanas hacia 2050, garantizar la seguridad alimentaria mediante la agricultura urbana se vuelve cada vez más crucial (UNITED NATIONS; DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS; POPULATION DIVISION, 2019). En este marco, el presente estudio tiene como objetivo caracterizar la presencia y distribución

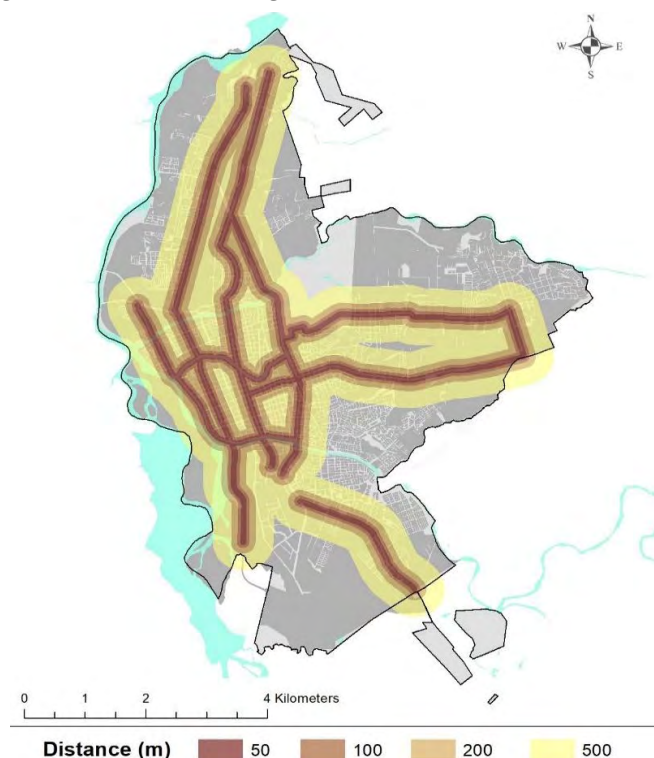
espacial de concentraciones de plomo en especies frutales localizadas en vías públicas de Neiva, con el fin de verificar si los niveles de este contaminante superan los límites permisibles en alimentos.

1. Materiales y métodos

1.1 Selección de frutos y área de muestreo

El área urbana de Neiva, Colombia, fue dividida sistemáticamente en diez zonas, cada una representando diferentes niveles de actividad industrial y tráfico vehicular (figura 1). Las zonas 6 y 9 fueron identificadas como áreas con presencia de pequeñas operaciones industriales, mientras que las demás zonas correspondieron principalmente a sectores residenciales con una mezcla de pequeños comercios. Ante la ausencia de un inventario formal de árboles frutales por parte de las autoridades locales, se realizó una identificación inicial de especies con base en la literatura de países con condiciones ambientales similares (DOUGLAS; IRGA; TORPY, 2019). El estudio se centró en árboles frutales localizados en espacios públicos como separadores viales, andenes y parques, particularmente aquellos más expuestos a la contaminación directa derivada de emisiones vehiculares y descargas industriales.

Figura 1 – Área de investigación de árboles alimentarios urbanos



Fuente: Autores, 2024

1.2 Recolección de muestras

Las muestras de frutos fueron recolectadas mediante un muestreo aleatorio estratificado, dirigido a las dos especies más predominantes identificadas en el censo inicial: *Mangifera indica* y *Syzygium malaccense*. Este método fue seleccionado con el fin de garantizar que las muestras fueran representativas de las diferentes condiciones ambientales presentes en el área de estudio. La estratificación se estableció en función de factores como la proximidad a zonas industriales, la densidad del tráfico y el nivel de urbanización.

Cada fruto seleccionado fue evaluado en términos de madurez, color y posición en el árbol para asegurar la consistencia en el muestreo. Para minimizar la contaminación externa, todas las muestras fueron recolectadas utilizando guantes y herramientas esterilizadas, y cada fruto se colocó en bolsas de polietileno herméticamente selladas y previamente rotuladas. Posteriormente, las bolsas fueron almacenadas inmediatamente en neveras portátiles a una temperatura de 4 °C, a fin de prevenir cambios bioquímicos durante el transporte. Las muestras fueron trasladadas al laboratorio en un tiempo máximo de 4 horas desde su recolección, manteniendo la cadena de frío en todo momento para preservar su integridad y permitir un análisis confiable.

1.3 Análisis de laboratorio

El análisis de laboratorio se realizó conforme a los protocolos internacionales establecidos por la Association of Official Analytical Collaboration (AOAC), tanto para la preparación de las muestras como para la cuantificación de las concentraciones de plomo (Pb).

En primer lugar, cada muestra de fruto fue lavada cuidadosamente con agua desionizada para eliminar contaminantes superficiales como polvo y material particulado. Después del secado al aire, las muestras fueron separadas manualmente en pulpa y semillas empleando instrumentos de acero inoxidable esterilizados. La pulpa se cortó en fragmentos pequeños y uniformes, los cuales fueron deshidratados en horno de convección a 100 °C durante 24 horas. Una vez desecadas, las muestras fueron molidas hasta obtener un polvo homogéneo y fino utilizando un mortero y pistilo de ágata, con el fin de evitar cualquier contaminación metálica.

La extracción de metales se realizó mediante digestión ácida asistida por microondas, utilizando una mezcla de ácido nítrico (HNO_3) concentrado y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en un sistema de vasos cerrados, de acuerdo con el método EPA 3052. Las muestras digeridas fueron posteriormente analizadas mediante espectroscopía de absorción atómica (AAS) a una longitud de onda de 217,0 nm. Los estándares de calibración se prepararon a partir de materiales de referencia certificados, y el límite de detección para Pb se estableció en 3,0 $\mu\text{g/L}$.

Como medidas de control de calidad, se incluyeron blancos, duplicados y muestras fortificadas, con el fin de garantizar la exactitud y precisión de los resultados obtenidos.

1.4 Análisis estadístico

Inicialmente, se aplicaron estadísticos descriptivos para resumir las tendencias centrales y las dispersiones de los datos de concentración de Pb en los frutos recolectados. La normalidad de la distribución fue evaluada rigurosamente mediante la prueba de Shapiro-Wilk, mientras que la homogeneidad de varianzas se verificó con las pruebas de Levene y Bartlett. Para comparar las concentraciones de Pb entre *Mangifera indica* y *Syzygium malaccense*, se aplicó una prueba t de Student para dos muestras, bajo el supuesto de varianzas iguales confirmado en las pruebas preliminares.

En cuanto al análisis espacial, se adoptó un enfoque geoestadístico integral. Se desarrollaron mapas de calor para visualizar la densidad de árboles frutales y la distribución espacial de las concentraciones de Pb en Neiva. Dichos mapas se elaboraron mediante estimación de densidad por núcleo (kernel density estimation), integrando tanto el inventario de especies arbóreas como datos oficiales sobre retención de calor urbano. La identificación de islas de calor urbano resultó fundamental para comprender la correlación entre zonas de mayor temperatura y niveles elevados de Pb.

La interpolación espacial de las concentraciones de Pb se realizó mediante kriging ordinario, lo que permitió obtener predicciones en ubicaciones no muestreadas. El modelo de kriging utilizó un semivariograma esférico, seleccionado a partir de los resultados de validación cruzada, garantizando el mejor ajuste a la estructura espacial de los datos. Asimismo, se generaron mapas de error de estimación para identificar áreas con incertidumbre significativa en las predicciones, lo cual servirá de guía para futuros esfuerzos de monitoreo.

2. Resultados

2.1 Identificación de árboles frutales en vías principales

Durante la fase exploratoria inicial, realizada en 2019, se identificó un total de 2.025 árboles frutales distribuidos a lo largo de las vías principales de Neiva. Las especies más prevalentes fueron *Syzygium malaccense*, con 962 individuos (47,5%), y *Mangifera indica*, con 717 individuos (35,4%). Estas especies se concentraron principalmente en zonas con mayor exposición al tráfico vehicular y a actividades industriales, correlacionándose con áreas previamente identificadas como potenciales puntos críticos de contaminación por plomo (Tabla 1).

Tabla 1 – Especies frutales en vías principales de Neiva (N = 2025)

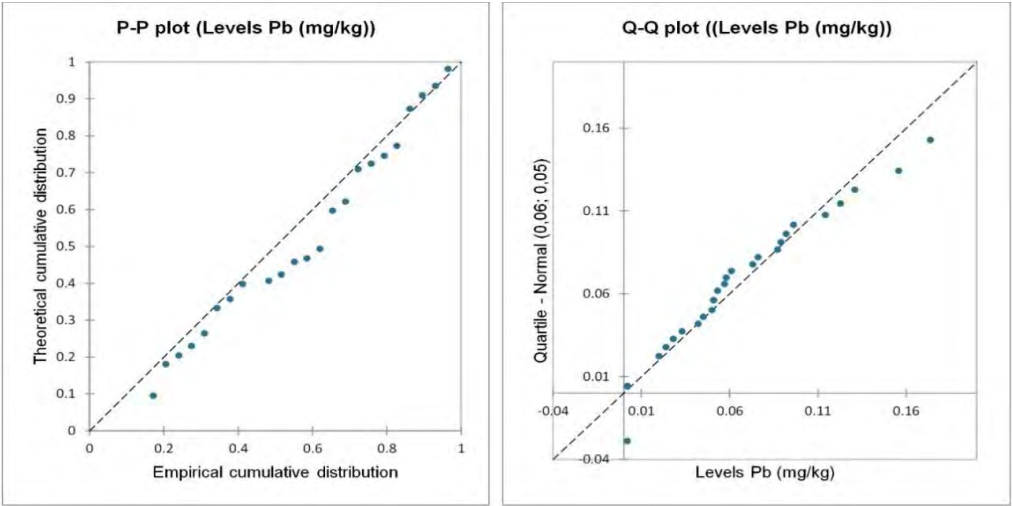
ESPECIES	N (%)
<i>Syzygium malaccense</i>	962 (47.5)
<i>Mangifera indica</i>	717 (35.4)
<i>Cocos nucifera</i>	117 (5.8)

ESPECIES	N (%)
<i>Morinda citrifolia</i>	84 (4.2)
<i>Anacardium occidentale</i>	35 (1.7)
<i>Citrus × Limon</i>	27 (1.3)
<i>Citrus × aurantium</i>	20 (1.0)
<i>Musa × paradisiaca</i>	15 (0.7)
<i>Melicoccus bijugatus</i>	14 (0.7)
<i>Psidium guajava</i>	13 (0.6)
<i>Carica papaya</i>	8 (0.4)
<i>Annona squamosa</i>	6 (0.3)
<i>Tamarindus indica</i>	5 (0.3)
<i>Citrus reticulata</i>	2 (0.1)

Fuente: el autor, 2024

Los niveles de plomo (Pb) fueron detectados en las 29 muestras de frutos analizadas, de las cuales 16 correspondieron a *Mangifera indica* y 13 a *Syzygium malaccense*. La concentración mediana de Pb para *Mangifera indica* fue de 0,075 mg/kg [rango intercuartílico: 0,093 – 0,052], mientras que *Syzygium malaccense* presentó una concentración mediana inferior de 0,024 mg/kg [rango intercuartílico: 0,051 – 0,002]. Estos valores sugieren que *Mangifera indica* podría tener una mayor tendencia a acumular plomo en comparación con *Syzygium malaccense* (Figura 2).

Figura 2 – Distribución acumulativa de Plomo



Fuente: el autor, 2024

Los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk no mostraron desviaciones significativas respecto a la normalidad en los niveles de Pb ($W = 0,941$; $p = 0,104$), lo que valida el uso de pruebas paramétricas. La homogeneidad de varianzas entre las dos especies fue confirmada mediante la prueba de Levene ($F = 0,054$; $p = 0,818$) y la prueba de Bartlett ($\chi^2 = 0,090$; $p = 0,765$). En consecuencia, los datos sustentaron la aplicación de una prueba t de Student para comparar las concentraciones de Pb entre *Mangifera indica* y *Syzygium malaccense*.

La prueba t de Student reveló una diferencia estadísticamente significativa en las concentraciones de Pb entre ambas especies ($p < 0,05$). *Mangifera indica* presentó una concentración media de Pb de $0,080 \text{ mg/kg} \pm 0,041$, superior a la observada en *Syzygium malaccense* ($0,039 \text{ mg/kg} \pm 0,044$). Estos resultados sugieren que *M. indica* podría ser más propensa a absorber plomo, posiblemente debido a sus características fisiológicas y a los microambientes en los que suele desarrollarse (PRASETIA et al., 2018).

El análisis de ANOVA no mostró diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de Pb entre las distintas zonas urbanas ($F = 0,497$; $p = 0,738$). Sin embargo, las concentraciones más elevadas se encontraron de manera consistente en las zonas con mayor actividad industrial, particularmente en las zonas 6, 9 y 10. Esta distribución espacial coincide con estudios previos que asocian niveles elevados de Pb con fuentes locales de contaminación, como emisiones industriales y tráfico vehicular (KRUPNOVA et al., 2021; SEVIK et al., 2020). Los mapas de calor generados mediante modelos de kriging ilustraron estos patrones, destacando las áreas con mayor riesgo de contaminación.

Al comparar los resultados con la norma internacional de inocuidad alimentaria CODEX STAN 193-1995, que establece un límite permisible de $0,1 \text{ mg/kg}$ de Pb en alimentos, se observó que cinco muestras superaron este umbral. Entre ellas, tres correspondieron a *Syzygium malaccense* en las zonas 2 y 10, con concentraciones de $0,131 \text{ mg/kg}$, $0,123 \text{ mg/kg}$ y $0,5095 \text{ mg/kg}$, respectivamente. Adicionalmente, dos muestras de *Mangifera indica* en las zonas 2, 6 y 9 presentaron concentraciones de $0,174 \text{ mg/kg}$, $0,114 \text{ mg/kg}$ y $0,156 \text{ mg/kg}$, respectivamente. Estos hallazgos evidencian los riesgos potenciales para la salud asociados al consumo de frutos en estas áreas y resaltan la necesidad de establecer un monitoreo ambiental continuo (CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION, 1995).

2.2 Geoestadística ambiental

La Figura 3 ilustra la distribución de los clusters de calor urbano en Neiva, elaborada mediante la integración del inventario de especies arbóreas frutales identificadas con fuentes oficiales de datos sobre retención de calor en la ciudad. El mapa de calor muestra que las mayores concentraciones de calor urbano se localizan en zonas con alta densidad de actividad industrial y tráfico vehicular, particularmente en el sector sur de la ciudad. Estas áreas, caracterizadas por la escasez de espacios verdes y la prevalencia de superficies impermeables, presentan una correlación significativa entre la reducción de la cobertura vegetal y el incremento en la retención de calor. La identificación de estos

clusters de calor resulta crucial para la planificación urbana, ya que pone de relieve la necesidad de intervenciones focalizadas orientadas a fortalecer la cobertura verde urbana y reducir el estrés térmico en estas zonas vulnerables.

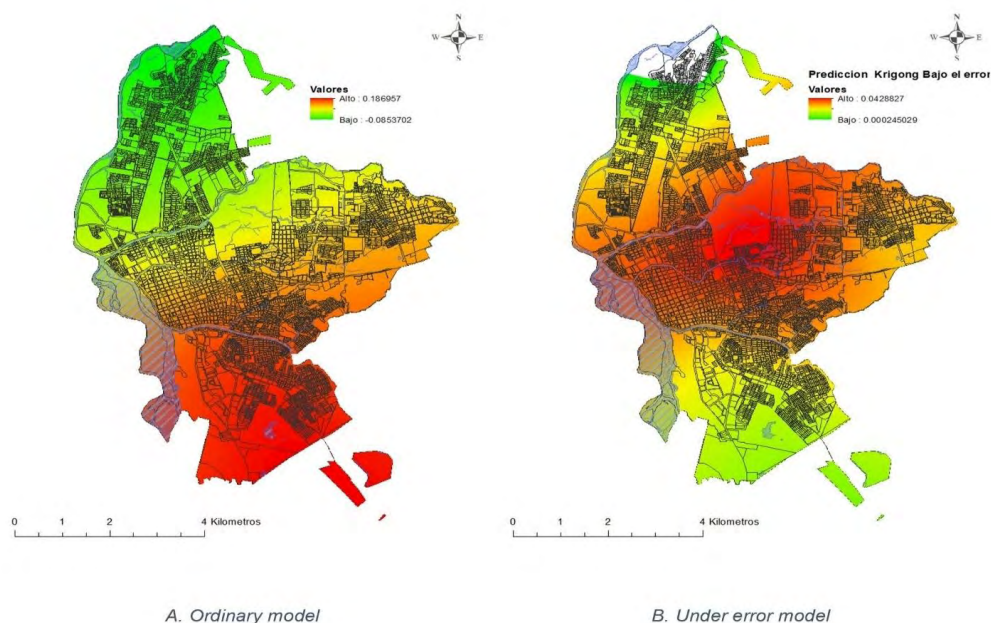
Figura 3 – Clusters de calor en el área urbana



Fuente: el autor, 2024

La primera imagen (A) de la Figura 4 muestra la distribución espacial predicha de las concentraciones de plomo (Pb) en Neiva, generada mediante el método de kriging ordinario. Este enfoque geoestadístico permite estimar los niveles de plomo en áreas no muestreadas a partir de la correlación espacial de los datos recolectados en los puntos de muestreo. El mapa revela que las concentraciones más elevadas de plomo se encuentran en las zonas industriales del sur de la ciudad, caracterizadas por una intensa actividad industrial y altos volúmenes de tráfico. Estos resultados son coherentes con las condiciones ambientales observadas y ponen de manifiesto la influencia de las emisiones industriales y vehiculares locales en la contaminación urbana por plomo.

Figura 4 – Modelos de predicción de Kriging



Fuente: el autor, 2024

La segunda imagen (B) de la Figura 4 incorpora la estimación del error en el modelo de kriging, destacando las áreas de incertidumbre en la predicción de las concentraciones de plomo (Pb). El mapa de error identifica zonas con variabilidad significativa en las predicciones, particularmente en el centro y oriente de la ciudad, lo cual podría atribuirse a datos inconsistentes o a fuentes de contaminación variables, como patrones de tráfico fluctuantes y usos mixtos del suelo. Estas áreas con mayor incertidumbre requieren un monitoreo ambiental focalizado y un muestreo más frecuente para refinar la precisión predictiva de los modelos de contaminación. Este análisis no solo refuerza la necesidad de un monitoreo localizado, sino que también contribuye a identificar zonas críticas donde deberían priorizarse las intervenciones de salud pública.

3. Discusión

La diversidad de especies de árboles frutales identificada en Neiva refleja un esfuerzo urbano significativo por aprovechar los espacios verdes tanto para el embellecimiento como para la producción alimentaria. La dominancia de *Mangifera indica* y *Syzygium malaccense* evidencia la adaptabilidad de estas especies al entorno urbano local, incluyendo su resiliencia frente a diversos contaminantes y estresores urbanos (TODOROV; BOGSAN, 2016). Sin embargo, la presencia de contaminación por Pb, particularmente en *Mangifera indica*, sugiere que, a pesar de los beneficios de la agroforestería urbana, existen riesgos

importantes para la salud ambiental que deben ser gestionados. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que resaltan el potencial de acumulación de metales pesados en árboles frutales urbanos, especialmente en áreas con alta actividad vehicular e industrial (AHMED; KAUR; HASSAN, 2022; SÄUMEL et al., 2012).

Las concentraciones más elevadas de plomo en *Mangifera indica* respecto a *Syzygium malaccense* pueden atribuirse a diversos factores, incluyendo diferencias fisiológicas específicas de cada especie y los microambientes en los que crecen los árboles (ALAHABADI et al., 2017; PRASETIA et al., 2018). Se sabe que *M. indica* presenta una mayor superficie foliar y de corteza, lo que puede favorecer su capacidad para absorber y acumular contaminantes atmosféricos (SAWIDIS et al., 2011). Esta observación es consistente con investigaciones en otros entornos urbanos, donde especies perennes de hoja ancha han mostrado mayores niveles de acumulación de metales pesados (VITTORI ANTISARI et al., 2015). Las concentraciones significativas de Pb detectadas en este estudio subrayan la necesidad de diseñar estrategias focalizadas que mitiguen los riesgos de exposición, particularmente en zonas con altas cargas contaminantes.

Los resultados muestran que el 17% de las muestras analizadas superaron el límite permisible de plomo establecido en el CODEX STAN 193-1995 (FAO; WHO, 2019). Estas superaciones se asociaron principalmente con árboles localizados en áreas de intenso tráfico vehicular y actividad industrial, corroborando estudios que identifican a las emisiones vehiculares y las descargas industriales como los principales contribuyentes a la contaminación urbana por metales pesados (SEVIK et al., 2020; WU et al., 2015). Estos hallazgos resaltan la necesidad de un monitoreo ambiental continuo y del desarrollo de prácticas de agroforestería urbana que prioricen la seguridad alimentaria. Asimismo, resulta importante considerar la posible variabilidad estacional en los niveles de contaminación, dado que las condiciones atmosféricas y la dispersión de contaminantes pueden influir significativamente en la bioacumulación de metales (LEVIN et al., 2020).

El análisis geoestadístico reveló una variabilidad espacial significativa en las concentraciones de Pb en Neiva, con los niveles más altos observados en las zonas industriales del sur y en áreas de tráfico denso. Estos resultados son congruentes con investigaciones previas que evidencian el carácter localizado de la contaminación por metales pesados en áreas urbanas (CHENG et al., 2009; WANG; XIE; LI, 2015). El análisis de error del modelo de kriging identificó además zonas con incertidumbre considerable, lo que enfatiza la necesidad de un monitoreo ambiental focalizado en estos sectores. En conjunto, los resultados sugieren que los planificadores urbanos deben implementar estrategias de intervención localizadas que se concentren en las zonas de mayor riesgo, con el fin de gestionar y mitigar eficazmente la exposición al plomo en contextos de agroforestería urbana.

Estos hallazgos tienen implicaciones relevantes para la agroforestería urbana y la planificación urbana. Los niveles significativos de contaminación por Pb detectados en áreas específicas resaltan los riesgos potenciales para la salud asociados al consumo de frutos cultivados en dichos entornos. Los planificadores urbanos y responsables de políticas públicas deben considerar estos resultados al desarrollar iniciativas de reverdecimiento urbano, asegurando que la seguridad alimentaria sea una prioridad. Estrategias como el

monitoreo periódico, la selección de especies menos susceptibles y la implementación de zonas de amortiguamiento alrededor de áreas de alto riesgo pueden contribuir a mitigar los riesgos asociados a la contaminación por metales pesados en la agroforestería urbana (MCCLINTOCK, 2010; ZUPANCIC; WESTMACOTT; BULTHUIS, 2015).

Conclusiones

Este estudio demostró que las áreas urbanas de ciudades intermedias, como Neiva (Colombia), presentan un potencial significativo para la producción alimentaria a través de la agroforestería urbana. No obstante, los resultados evidencian un desafío crítico: la presencia de contaminación por plomo (Pb) en árboles frutales, particularmente *Mangifera indica* y *Syzygium malaccense*. Aproximadamente el 17% de las muestras analizadas superaron los límites permisibles de Pb en alimentos, con los niveles más altos registrados en zonas industriales y áreas de tráfico vehicular intenso. Estos hallazgos subrayan la necesidad de intervenciones ambientales focalizadas y de un monitoreo más estricto para garantizar la inocuidad de los frutos cultivados en entornos urbanos.

La detección de niveles elevados de Pb en ciertas zonas urbanas plantea serias preocupaciones de salud pública. El consumo de frutos contaminados con plomo representa un riesgo, en particular para poblaciones vulnerables. A medida que la agricultura urbana se expande, resulta indispensable implementar estrategias que minimicen la exposición a contaminantes, incluyendo la selección de especies menos propensas a absorber metales pesados, el establecimiento de zonas de amortiguamiento entre las áreas de alto riesgo y los sitios de cultivo, y la realización de evaluaciones periódicas de la calidad del aire y del suelo. Estas medidas son esenciales para proteger la salud de los residentes urbanos y garantizar la sostenibilidad de las iniciativas de agroforestería urbana.

Los hallazgos de este estudio resaltan la necesidad de que los planificadores urbanos incorporen la seguridad alimentaria como criterio clave en el diseño y desarrollo de espacios verdes. Esto implica priorizar las áreas con bajos niveles de contaminación para proyectos de agroforestería urbana e integrar el monitoreo ambiental en los procesos de planificación urbana. Futuras investigaciones deberán explorar los mecanismos de bioacumulación de otros contaminantes en diversas especies frutales urbanas, así como los impactos a largo plazo de la contaminación urbana en la seguridad alimentaria. Se recomienda además la realización de estudios longitudinales que permitan monitorear la evolución de los niveles de contaminantes a lo largo del tiempo, fundamentales para el desarrollo de prácticas agrícolas urbanas sostenibles.

En conclusión, aunque la agroforestería urbana ofrece beneficios prometedores para las ciudades intermedias, particularmente en materia de seguridad alimentaria y reverdecimiento urbano, su implementación debe abordarse con cautela. Garantizar que los alimentos producidos en la ciudad sean seguros para el consumo requiere un esfuerzo colaborativo entre planificadores urbanos, científicos ambientales y autoridades de salud pública. Al integrar el monitoreo ambiental y la gestión del riesgo en las prácticas de agricultura urbana, las ciudades podrán aprovechar los beneficios de la agroforestería protegiendo al mismo tiempo la salud de sus habitantes.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la **Universidad Complutense de Madrid** por el apoyo brindado en el desarrollo de esta investigación y a la **Universidad de Manizales**, por el apoyo brindado a través del Doctorado en administración.

Referencias

- AHMED, Z. F. R.; KAUR, N.; HASSAN, F. E. Ornamental Date Palm and Sidr Trees: Fruit Elements Composition and Concerns Regarding Consumption. *International Journal of Fruit Science*, v. 22, n. 1, p. 17–34, 2022.
- ALAHABADI, A. et al. A comparative study on capability of different tree species in accumulating heavy metals from soil and ambient air. *Chemosphere*, v. 172, p. 459–467, 2017.
- ALLOWAY, B. J. Sources of Heavy Metals and Metalloids in Soils. Em: [s.l: s.n.]. p. 11–50.
- BOQUETE, M. T. et al. Effect of age on the heavy metal concentration in segments of *Pseudoscleropodium purum* and the biomonitoring of atmospheric deposition of metals. *Atmospheric Environment*, v. 86, p. 28–34, 2014.
- BORKOWSKI, A. SZ.; KWIATKOWSKA-MALINA, J. Geostatistical modelling as an assessment tool of soil pollution based on deposition from atmospheric air. *Geosciences Journal*, v. 21, n. 4, p. 645–653, 1 ago. 2017.
- BUNGE, A. et al. Urban foraging for food security and sovereignty: Quantifying edible forest yield in Syracuse, New York using four common fruit- and nut-producing street tree species. *Journal of Urban Ecology*, v. 5, n. 1, 2019.
- CASTRO, J. et al. “edible” urban forests as part of inclusive, sustainable cities. *Unasylda*, v. 69, n. 250, p. 59–65, 2018.
- CHENG, W. et al. Integrating classification and regression tree (CART) with GIS for assessment of heavy metals pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 158, n. 1–4, p. 419–431, 13 nov. 2009.
- CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION. General standard for contaminants and toxins in food and feed (CXS 193-1995). Roma: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/en/>>. Acesso em: 24 ago. 2024.
- DOUGLAS, A. N. J.; IRGA, P. J.; TORPY, F. R. Determining broad scale associations between air pollutants and urban forestry: A novel multifaceted methodological approach *. *Environmental Pollution*, v. 247, p. 474–481, 2019.
- FAO; WHO. GENERAL STANDARD FOR CONTAMINANTS AND TOXINS IN FOOD AND FEED, CXS 193-1995. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/es/?lnk=1&url=https%25253A%25252F%25>>. Acesso em: 11 jul. 2020.

GORI, A.; FERRINI, F.; FINI, A. Growing healthy food under heavy metal pollution load: Overview and major challenges of tree based edible landscapes. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 38, p. 403–406, fev. 2019.

HENSHAW, S. L. et al. Geostatistics and GIS: Tools for Characterizing Environmental Contamination. *Journal of Medical Systems*, v. 28, n. 4, p. 335–348, ago. 2004.

IGLESIAS, B. M. Intermediary cities in the territorial integration of the Global South. *Revista CIDOB d'Afers Internacionals*, v. 2016, n. 114, p. 109–132, 2016.

KRUPNOVA, T. G. et al. Apple trees as a possible monitor and phytoremediator of urban and industrial areas in Chelyabinsk, Russian Federation. *Biodiversitas*, v. 22, n. 7, p. 2824–2828, 2021.

LEVIN, R. et al. Lead seasonality in humans, animals, and the natural environment. *Environmental Research*, v. 180, p. 108797, 2020.

LV, J. et al. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils. *Journal of Hazardous Materials*, v. 261, p. 387–397, out. 2013.

MCCLINTOCK, N. Why farm the city? Theorizing urban agriculture through a lens of metabolic rift. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, v. 3, n. 2, p. 191–207, 1 jul. 2010.

MEHARG, A. A. Perspective: City farming needs monitoring. *Nature*, v. 531, n. 7594, p. S60–S60, 16 mar. 2016.

NICKEL, S. et al. Modelling and mapping heavy metal and nitrogen concentrations in moss in 2010 throughout Europe by applying Random Forests models. *Atmospheric Environment*, v. 156, p. 146–159, maio 2017.

OLIVA, S. R.; VALDÉS, B. Metal concentrations in Seville orange (*Citrus aurantium*) fruits from Seville (Spain) and Palermo (Italy). *Annales Botanici Fennici*, v. 40, n. 5, p. 339–344, 2003.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *CATENA*, v. 113, p. 56–69, fev. 2014.

PRASETIA, H. et al. *Mangifera indica* as Bioindicator of Mercury Atmospheric Contamination in an ASGM Area in North Gorontalo Regency, Indonesia. *Geosciences*, v. 8, n. 1, p. 31, jan. 2018.

ROUHANI, S. Geostatistical Estimation: Kriging. Em: *Geostatistics for Environmental and Geotechnical Applications*. [s.l.] ASTM International 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1996. p. 20–31.

SÄUMEL, I. et al. How healthy is urban horticulture in high traffic areas? Trace metal concentrations in vegetable crops from plantings within inner city neighbourhoods in Berlin, Germany. *Environmental Pollution*, v. 165, p. 124–132, 2012.

SAWIDIS, T. et al. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. *Environmental Pollution*, v. 159, n. 12, p. 3560–3570, dez. 2011.

SEVIK, H. et al. Changes in heavy metal accumulation in some edible landscape plants depen-

ding on traffic density. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 192, n. 2, 2020.

SIGUA, G. C.; HUDNALL, W. H. Kriging analysis of soil properties. *Journal of Soils and Sediments*, v. 8, n. 3, p. 193–202, 3 jun. 2008.

SRIVASTAVA, R. M. Geostatistics: A toolkit for data analysis, spatial prediction and risk management in the coal industry. *International Journal of Coal Geology*, v. 112, p. 2–13, jun. 2013.

TODOROV, S. D.; BOGSAN, C. S. *Tropical Fruits-- From Cultivation to Consumption and Health Benefits : Guava and Mango*. New York: Nova Science Publishers, Inc, 2016.

UNITED NATIONS; DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS; POPULATION DIVISION. *World Urbanization Prospects 2018: Highlights*. New York: UN, 2019.

USENI, Y. S. et al. Diversity, use and management of household-located fruit trees in two rapidly developing towns in Southeastern D.R. Congo. *Urban Forestry and Urban Greening*, v. 63, 2021.

VALDERRAMA, C. FELIPE et al. Análisis de la agroforestería urbana: una revisión sistemática y análisis bibliométrico. *Colombia forestal*, v. 26, n. 2, p. 77–91, 1 jul. 2023.

VITTORI ANTISARI, L. et al. Uptake and translocation of metals and nutrients in tomato grown in soil polluted with metal oxide (CeO_2 , Fe_3O_4 , SnO_2 , TiO_2) or metallic (Ag, Co, Ni) engineered nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 22, n. 3, p. 1841–1853, 2015.

VON HOFFEN, L. P.; SÄUMEL, I. Orchards for edible cities: Cadmium and lead content in nuts, berries, pome and stone fruits harvested within the inner city neighbourhoods in Berlin, Germany. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 101, n. 1, p. 233–239, 2014.

WANG, Q.; XIE, Z.; LI, F. Using ensemble models to identify and apportion heavy metal pollution sources in agricultural soils on a local scale. *Environmental Pollution*, v. 206, p. 227–235, nov. 2015.

WARD, H. C. et al. Effects of urban density on carbon dioxide exchanges: Observations of dense urban, suburban and woodland areas of southern England. *Environmental Pollution*, v. 198, p. 186–200, 2015.

WU, S. et al. Levels and health risk assessments of heavy metals in urban soils in Dongguan, China. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 148, p. 71–78, 2015.

YUFENG GE et al. A Comparison of Regression and Regression-kriging for Soil Characterization Using Remote Sensing Imagery. 2007 Minneapolis, Minnesota, June 17-20, 2007. *Anais...St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007.

ZUPANCIC, T.; WESTMACOTT, C.; BULTHUIS, M. The impact of green space on heat and air pollution in urban communities: A meta-narrative systematic review. *A meta-narrative systematic review*, 2015.

Christian Valderrama

✉ chrivald@ucm.es

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2260-5046>

Editor Responsable

José Irivaldo Alves Oliveira Silva

Editor Asociado

Rylanneive Teixeira

Hernan Zarate

✉ hzarate105280@umanizales.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9851-7857>

Enviado en: 25/08/2024

Aceptado en: 02/05/2025

2025;28:e00147

Declaración de disponibilidad de datos:

Los datos de investigación solo están disponibles previa solicitud.

Obs: Los conjuntos de datos relacionados con este artículo estarán disponibles previa solicitud al autor correspondiente. La mayor parte de los datos utilizados en esta investigación —incluyendo identificación, información censal, análisis de muestras y los respectivos resultados (Figura 1, 3, Tabla 1)— está disponible en el propio artículo. Además, los datos relacionados con la información geoestadística estarán disponibles previa solicitud formal al autor correspondiente (Figura 4), debido al gran volumen y tamaño de estos archivos.

Mediante esta solicitud, los interesados podrán obtener el *modelo de kriging*, junto con su configuración y la información complementaria descrita en el artículo, para fines de investigaciones adicionales.

Distribuição Espacial de Chumbo em *Mangifera indica* e *Syzygium malaccense* em uma Cidade de Médio Porte, Colômbia

Christian Valderrama
Hernan Zarate

Resumo: O desenvolvimento urbano descontrolado e o deslocamento populacional aumentaram a necessidade de desenvolver estratégias que mitiguem a insegurança alimentar na América Latina. Esta pesquisa caracterizou a presença e a distribuição espacial de concentrações de chumbo (Pb) em espécies de árvores frutíferas nas vias públicas de Neiva, Colômbia. Um censo identificou *Mangifera indica* e *Syzygium malaccense* como as espécies mais prevalentes. Amostras de frutas foram coletadas e analisadas de acordo com padrões internacionais. Métodos de interpolação espacial e Kriging foram utilizados para mapear as concentrações de chumbo no ambiente urbano. Foram detectados níveis de chumbo em todas as amostras, com cinco delas excedendo o limite permissível de 0,1 mg/kg. As concentrações mais elevadas foram observadas em áreas industriais. Esses achados destacam a importância de estabelecer estratégias de agrofloresta urbana em áreas com baixos níveis de contaminação e indicam a necessidade de futuras pesquisas que zonifiquem a agricultura urbana.

São Paulo. Vol. 28, 2025

Artigo Original

Palavras-Chave: Floresta Urbana de Alimentos; Metal pesado; Paisagem Comestível; Serviços Ecossistêmicos; Sustentabilidade

Spatial Lead Distribution in *Mangifera indica* and *Syzygium malaccense* in a Medium-Sized City, Colombia

Christian Valderrama
Hernan Zarate

Abstract: Uncontrolled urban development driven by forced migration has heightened the need for strategies to mitigate food security in Latin America. This study aims to characterize the presence and spatial distribution of lead (Pb) concentrations in fruit-bearing tree species along public roads in Neiva, Colombia, a medium-sized city. A comprehensive census identified *Mangifera indica* and *Syzygium malaccense* as the most prevalent species. Fruit samples were collected and analyzed according to FAO standards. Spatial interpolation and Kriging methods were employed to map lead concentrations across the urban landscape. Results revealed detectable levels of lead in all samples, with five samples exceeding the permissible limit of 0.1 mg/kg. The highest concentrations were observed in industrial areas, suggesting significant contamination from vehicular and industrial activities. These findings underscore the importance of urban agroforestry strategies in areas with lower contamination levels and highlight the need for further research to identify safer urban agriculture zones.

São Paulo. Vol. 28, 2025

Original Article

Keywords: Ecosystem Services; Edible landscape; Heavy metal; Sustainability; Urban food forest.