

VARIACIÓN MORFOMÉTRICA Y ESPACIAL DE TRES ESPECIES ARBÓREAS EN FUNCIÓN DEL ANCHO DE CAMELLÓN EN CALLES DE LA CIUDAD DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

MORPHOMETRIC AND URBAN SPATIAL VARIATION OF THREE TREE SPECIES IN RELATION TO STREET MEDIAN WIDTH IN THE CITY OF SAN LUIS POTOSÍ, MEXICO

Candia, L.A., C. R. Ramos Palacios, J.H. González Lugo, F. Alvarado

VARIACIÓN MORFOMÉTRICA Y ESPACIAL DE TRES ESPECIES ARBÓREAS EN
FUNCIÓN DEL ANCHO DE CAMELLÓN EN CALLES DE LA CIUDAD DE SAN LUIS
POTOSÍ, MÉXICO

MORPHOMETRIC AND URBAN SPATIAL VARIATION OF THREE TREE SPECIES
IN RELATION TO STREET MEDIAN WIDTH IN THE CITY OF SAN LUIS POTOSÍ,
MEXICO



Variación morfométrica y espacial urbana de tres especies arbóreas en función del ancho de camellón en calles de la ciudad de San Luis Potosí, México

Morphometric and urban spatial variation of three tree species in relation to street median width in the city of San Luis Potosí, Mexico

Candia, L.A.
C. R. Ramos Palacios,
J.H. González Lugo,
F. Alvarado

VARIACIÓN
MORFOMÉTRICA Y
ESPACIAL DE TRES
ESPECIES ARBÓREAS EN
FUNCIÓN DEL ANCHO DE
CAMELLÓN EN CALLES DE
LA CIUDAD DE SAN LUIS
POTOSÍ, MÉXICO

MORPHOMETRIC AND
URBAN SPATIAL
VARIATION OF THREE
TREE SPECIES IN
RELATION TO STREET
MEDIAN WIDTH IN THE
CITY OF SAN LUIS POTOSÍ,
MEXICO

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 199-227. Julio 2025

DOI:

10.18387/polibotanica.60.12

Andrea Candia Lomeli / candia.lomeli@gmail.com 
<https://orcid.org/0009-0000-9982-5480>

Maestría Interdisciplinaria en Ciudades Sostenibles
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Carlos Renato Ramos Palacios <https://orcid.org/0000-0002-3390-364X>
Facultad del Hábitat, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Fredy Alvarado <https://orcid.org/0000-0002-6724-4064>
División de Ciencias Ambientales

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica

Jonathan Hammurabi González Lugo <https://orcid.org/0000-0001-6883-5950>
Facultad del Hábitat, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

RESUMEN: Las condiciones físicas y ambientales del sistema urbano, generalmente, se contraponen al desarrollo de las especies arbóreas tanto por sus dimensiones como por las funciones y beneficios ambientales. Dentro de la variedad de hábitats urbanos para árboles —como bosques urbanos, parques de barrio, jardines vecinales y glorietas—, los árboles con mayor exposición a agentes adversos son los que se encuentran en calles, siendo más comunes los ubicados en banquetas o camellones. En el presente estudio la interrogante fue analizar la influencia de la variación en el ancho del camellón sobre la morfometría y las funciones ambientales indirectas de tres especies de árboles urbanos. Se evaluaron las variables alométricas de la altura del árbol (Aa), área de proyección de copa (APC) y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de 127 fresnos, 99 laureles de la India y 80 pirules, seleccionadas por su abundancia en camellones y por presentar copas sin podas severas recientes ni daños visible. Las mediciones se realizaron en 179 camellones de tres categorías según su ancho (≤ 1.8 m, $>1.8-5$ m, y >5 m) en 3 distritos centrales de la ciudad de San Luis Potosí, México. También, se utilizó el programa libre de i-Tree Eco para estimar de forma indirecta el valor de importancia (VI), el área foliar (AF) y el secuestro bruto de carbono (SBC) como variables estrechamente asociadas a la morfometría del arbolado, con el objetivo de analizar su variación en relación con el ancho del camellón. Asimismo, se consideraron características del entorno urbano —orientación de la calle, proporción altura del edificio—ancho de calle (AE–AC) y tipo de tránsito vehicular— por su posible influencia en las condiciones de desarrollo del arbolado. En los resultados, el pirul mostró los valores más grandes de alometría entre APC y Aa ($R^2=0.74$) y promedio de AF (236.2 m²), pero sin distinción por un tipo de camellón. En laurel de la India la respuesta indicó valores medios y preferentemente en camellón mediano y estrecho. Por su parte, el fresno presentó los valores promedio más bajos en las variables morfométricas (12.7m de Aa, 165m² de APC y 41.7 cm de DAP) y el mayor promedio en general de SBC (10.2 kg/año), con mayor contribución en camellón amplio (12.6 kg/año). Por lo tanto, la morfometría varió en función del ancho del camellón, destacando la alta adaptación morfológica del pirul y una mayor estimación de secuestro de carbono en el caso del fresno. La evidencia obtenida sugiere que la configuración urbana y la

respuesta morfológica pueden ser de utilidad en la planeación de infraestructura verde en las calles buscando aumentar los beneficios ambientales para la ciudad.

Palabras clave: ancho de camellón, arbolado urbano, configuración urbana, morfometría arbórea, servicios ambientales.

ABSTRACT: The physical and environmental conditions of urban systems often conflict with the development of tree species due to spatial constraints and limitations in ecological functions and benefits. Among urban tree habitats—such as urban forests, neighborhood parks, community gardens, and traffic circles—street trees, particularly those planted in sidewalks or median strips, face the most exposure to adverse factors. This study aimed to analyze how variations in median width influence the morphometry and indirectly estimated environmental functions of three urban tree species. Allometric variables, including tree height (TH), crown projection area (CPA), and diameter at breast height (DBH), were measured for 127 ash trees, 99 Indian laurels, and 80 Peruvian peppers. These species were selected for their abundance in medians and crowns showing no recent severe pruning or visible damage. Data were collected from 179 median strips categorized by width (≤ 1.8 m, >1.8 –5 m, and >5 m) in three central districts of San Luis Potosí, Mexico. The open-source software i-Tree Eco was used to model importance value (IV), leaf area (LA), and gross carbon sequestration (GCS)—variables closely linked to tree morphometry—to analyze their variation in relation to median width. Urban context variables, such as street orientation, building height–street width ratio (BH–SW), and vehicular traffic type, were also assessed for their potential influence on tree development. Results showed that peruvian pepper exhibited the strongest allometric relationship between CPA and TH ($R^2 = 0.74$) and the highest average LA (236.2 m²), though these values did not differ significantly across median types. Indian laurel displayed intermediate values, with a preference for medium and narrow medians. The ash recorded the lowest average morphometric values (12.7 m TH, 165 m² CPA, and 41.7 cm DBH) but the highest overall GCS (10.2 kg/year), peaking in wide medians (12.6 kg/year). Morphometric variation was thus influenced by median width, highlighting peruvian pepper morphological adaptability and the ash superior carbon sequestration potential. This evidence suggests that urban design parameters and species-specific morphological responses can inform green infrastructure planning in streetscapes to enhance environmental benefits for cities. **Key words:** environmental services, street median width, tree morphometry, urban configuration, urban trees.

INTRODUCCIÓN

Los árboles son un componente fundamental en los sistemas urbanos, por los servicios ambientales que ofrecen y su belleza en el paisaje de la ciudad. Por el tipo de habito de crecimiento, el árbol sobresale en forma, tamaño y altura en diversos espacios verdes de las urbes, los cuales pueden variar debido a su entorno donde se encuentra. Generalmente, los parques urbanos ofrecen las condiciones más adecuadas para el desarrollo de los árboles, por el contrario, las vialidades son espacios más restrictivos, caracterizados por limitaciones físicas. Al ser las calles un lugar donde es posible la incorporación de infraestructura verde (Rodríguez-Valencia y Ortiz-Ramírez, 2021) los árboles deben crecer en un medio donde es más alta su exposición a los agentes ambientales urbanos como el aumento de temperatura por efecto de isla de calor, contaminación atmosférica, escasez de agua o cambios en la circulación del viento urbano. Ante este escenario los árboles pueden mostrar signos observables en su morfología y efectos ecológicos y ambientales importantes.

La abundancia de follaje, así como las dimensiones y volumen de copa son aspectos morfológicos fundamentales que definen el tipo y la función de sombra de un árbol. Además, mientras mayor ramificación en la copa y área foliar presenten los árboles mayores cantidades de radiación solar podrán absorber (Tochaiwat k, 2023). Así, la densidad de su follaje permite regular la energía

radiante y disminuir la velocidad del viento a nivel del suelo (McPherson y Simpson, 1995, Ren *et al.*, 2023). Al mismo tiempo, es probable una mayor absorción de bióxido de carbono del aire, cuya disminución en la atmósfera es prioritaria en el ámbito urbano (Díaz-Porras *et al.*, 2014; Liang y Huang, 2023; Rasoolzadeh *et al.*, 2024). La capacidad de secuestro bruto de CO₂ en árboles urbanos, cuantificada como flujo neto de carbono asimilado, presenta una dependencia directa de atributos morfológicos foliares y estructurales, particularmente del índice de área foliar y la densidad de biomasa en la copa, que modulan la eficiencia fotosintética y la capacidad de almacenamiento (Jin *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024). La optimización de este servicio ambiental requiere trascender el enfoque individual hacia un análisis comunitario mediante el valor de importancia (VI), un índice sintético que pondera la abundancia relativa, frecuencia y dominancia de las especies (Thomas *et al.*, 2022; A. K. Singh *et al.*, 2023).

A través de esta interacción con el ambiente los árboles pueden ser elementos naturales con efectos micro climáticos favorables. Tales propiedades son especialmente importantes en las calles, por ser una fuente de alta carga de gases contaminantes debido a la constante carga vehicular en una ciudad (Rakowska *et al.*, 2014, Mansour y Aljamil, 2022). No obstante, y a pesar de tales beneficios, el espacio que brindan las calles es muy limitado para el desarrollo de los árboles (Mullaney *et al.*, 2015). Por tanto, los dos tipos de área verde que frecuentemente se localizan en la calle son la franja verde de banqueta o el camellón. Cuando este último está habilitado como área verde a lo largo de la calle plantea ciertas condiciones urbanas y ambientales que pueden influir tanto en la morfología como en las funciones de los árboles. Además, otros factores que pueden influir en la variación de los árboles son las propiedades genéticas, morfológicas de cada especie, así como los efectos ambientales derivados del clima urbano, el suelo antrópico y la limitación de espacio subterráneo.

En cuanto al camellón, sus características propias del diseño como el uso y otras particularidades del entorno son importantes para determinar el grado de influencia en el arbolado. Por ejemplo, es necesario saber el tipo de flujo de tráfico que va a separar el camellón, el nivel de seguridad vial de la calle en cuestión (ODOT, 1996; Fitzpatrick *et al.*, 2004; Findley, 2016) o los estándares de tipo y diseño de calles (City of Melbourne, 2010; National Association of City Transportation Officials, 2012). Otros factores son la configuración urbana y la disposición de edificaciones circundantes que pueden afectar el crecimiento de los árboles (Czaja *et al.*, 2020). Un aspecto importante de la configuración urbana es la orientación de la calle al variar la energía solar aprovechable en el suelo y otras superficies, especialmente en latitudes entre 20° y 40° (Boeters *et al.*, 2012; Cedano Billini, 2013). La orientación de una calle puede marcar el grado de exposición solar que recibe el árbol establecido en el espacio urbano (Shashua-Bar y Hoffman, 2003; Zielonko-Jung y Janiak, 2022). Además, el grado de exposición de luz solar también depende de la proporción altura de edificio - ancho de calle. La proporción entre la altura del edificio y el ancho de calle (AE-AC) es un fenómeno que permite identificar configuraciones urbanas contrastantes, como calles amplias con edificaciones bajas o calles estrechas con edificios altos (Oke, 1988b). Estas condiciones modifican la disponibilidad de radiación solar, influyendo en la fisiología del arbolado urbano. En especies adaptadas a alta luminosidad, la reducción de luz puede disminuir la fotosíntesis máxima, reducir el punto de compensación lumínica y generar hojas más delgadas (Kjelgren y Clark, 1992). En cambio, en especies tolerantes a la sombra, la restricción de luz puede favorecer su desempeño fotosintético (Takagi y Gyokusen 2004).

La configuración del medio construido es importante para conocer las condiciones que enfrenta el área verde. El arreglo de los elementos construidos puede condicionar las características del espacio de la calle (Guzzetti *et al.*, 2019; Wan Ismail *et al.*, 2020; Fang *et al.*, 2021). Generalmente, la creación de un camellón depende del espacio disponible, el tipo de calle y su función en la zona urbana (ODOT, 1996; City of Melbourne, 2010; DOT, 2015), y a su vez esto define las dimensiones y el ancho del mismo (SEDATU, 2019), afectando el espacio disponible de área verde. Entonces, la función de la vialidad también puede influir en las dimensiones de los camellones. Según IMPLAN de Hermosillo (2017) si el camellón forma parte de la infraestructura verde de la ciudad, su amplitud variará según el tipo de técnica, como jardín de lluvia (máximo 15 m), jardín de microcuena (mínimo 2 m), pozo de infiltración (mínimo 15 m)

o drenaje francés (mínimo 0.5 m). Por otro lado, el reglamento de parques y jardines del Ayuntamiento de San Luis Potosí (2002) menciona en los artículos 37 a 40 del Reglamento de Parques y Jardines Públicos de la ciudad establece categorías de amplitud de camellones, especificando el tamaño de las franjas de tierra según el tipo de especies vegetales, indicando que en camellones de 30-40 cm (Art. 37) y ≥ 41 cm (Art. 38) se permiten especies como camelia, mezquite o ciprés de Arizona, y en camellones de 76-120 cm (Art. 39) y 121-200 cm (Art. 40) se autorizan árboles de mayor porte como liquidámbar, fresno o palma washingtonia.

Otro factor fundamental es el manejo de los árboles en la calle, ya que este puede afectar el desarrollo de los mismos y los beneficios ambientales que ofrecen. Por tanto, las dimensiones de los árboles experimentan limitaciones en el espacio verde, tanto en el desarrollo radicular como en la ramificación aérea. Una de las causas más notorias de alteración en la morfología del arbolado urbano son las podas mal aplicadas. Estas prácticas pueden inducir el desarrollo de brotes excesivos que modifican la estructura natural de la copa y afectan el patrón de crecimiento del árbol (Suchocka *et al.*, 2021). La poda en el nivel de copa reduce sus funciones en cuanto a los servicios ecosistémicos que proporcionan (Tan *et al.*, 2021). Prácticas de manejo inadecuadas no solo alteran la estructura del árbol, sino que también disminuyen su valor de importancia y su capacidad de secuestro de carbono, afectando directamente beneficios como la mitigación del cambio climático y la calidad del aire (Muscas *et al.*, 2024; Speak y Salbitano, 2023).

Una práctica de manejo inadecuado (desmoche) o de afectación mecánica puede generar diferentes efectos, desde el estrés fisiológico (Cox, 2011) hasta el debilitamiento de la estructura del árbol (Suchocka *et al.*, 2021). En contraste, la conformación de espacios de vialidad con arbolado en buenas condiciones permite servicios ambientales favorables en zonas de tránsito vehicular (Langenheim *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2020), así como mayor protección y confort para los peatones (Sanusi *et al.*, 2017; Srivanit y Jareemit, 2020; Eisenman *et al.*, 2021).

Finalmente, las formas, funciones y condiciones de los árboles urbanos pueden experimentar constantes afectaciones debido al entorno urbano. El presente estudio analiza cómo la amplitud del camellón influye en la morfología de tres especies arbóreas y, consecuentemente, en su valor de importancia (VI) y secuestro bruto de carbono (SBC), métricas clave para evaluar su contribución ambiental al entorno urbano. Se plantea que, ante una mayor amplitud del camellón, los atributos morfométricos de los árboles permitirán reflejar mayores beneficios ambientales. A este respecto, los árboles de camellón bajo condiciones de menor condición de manejo y morfología inalterada fueron claves para el estudio. De esta manera, en esta investigación se determinó la variación morfométrica de tres especies de árboles bajo tres diferentes anchos de camellón en calles de la ciudad de San Luis Potosí,

MATERIALES Y MÉTODO

Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en la ciudad de San Luis Potosí, México, que se localiza entre las coordenadas 22° 01' 34" - 22° 13' 06" Latitud Norte y 101° 02' 39" - 100° 53' 21" Longitud Oeste. Su altitud promedio es de 1,863 m s.n.m; los climas dominantes son árido templado con inviernos secos (BW_{kw}), semiárido templado con inviernos secos (BS_{0kw}) y semiseco templado (BS_{1w}) (García, E.2004; INEGI, 2017). Noyola-Medrano *et al.* (2009) señalan que la precipitación anual promedio es inferior a 400 mm, mientras que la temperatura media anual es de 17 °C, con máximas de 34 °C y mínimas de 0 °C. La época cálida se presenta de marzo a octubre, y la fría, de noviembre a febrero. Por otro lado, Tejeda-Martínez y Gómez-Azpeitia (2015) indican que San Luis Potosí es una de las regiones del país con mayores horas de insolación anual estimada a través de la frecuencia de días nublados, la nubosidad media y la cantidad de días despejados.

Definición de sitios y especies de árboles objeto de estudio

Selección de las áreas de estudio

La metodología empleada se fundamenta en un enfoque de análisis espacial urbano que incorpora herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), las cuales permiten integrar

múltiples capas temáticas provenientes de distintas fuentes y escalas bajo un mismo sistema de coordenadas. Esta capacidad facilita la realización de operaciones espaciales complejas y la generación automatizada de mapas derivados (Correa, 2018; Hernández López y Montalvo Vargas, 2020). En este estudio, la metodología se fundamenta en un enfoque de análisis espacial urbano que integra herramientas SIG de uso nacional con delimitaciones institucionales locales. En particular, se utilizó un mapa base (Figura 1) sobre el cual se integraron datos vectoriales que delimitan la ciudad de San Luis Potosí y su estructura urbana, obtenidos del Marco Geoestadístico del Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020b), así como de las manzanas del Inventario Nacional de Vivienda (INEGI, 2020a). Posteriormente, se incorporaron los límites distritales de la zonificación secundaria del centro de población definidos por el Programa de Desarrollo Urbano (IMPLAN SLP, 2021). La estructura específica de capas vectoriales fue adaptada al contexto local con el fin de representar con mayor precisión la configuración urbana del área de estudio.

Para efectos de este estudio, se entiende por camellón a la franja central ubicada entre carriles de circulación vial con funciones de separación del tránsito vehicular y, en muchos casos, con presencia de cobertura vegetal (National Academies of Sciences, 2023; SEDATU, 2023). Con base en esta definición, el estudio se llevó a cabo en tres de los cinco distritos en que se divide la ciudad, cuya selección fue por el alto número de calles con presencia de camellones. A continuación, al mapa base se incorporaron los datos vectoriales del Servicio e Información Complementaria de Tipo de Área, incluidos en el Marco Geoestadístico del Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020b), los cuales detallan la ubicación de los camellones en la ciudad. A partir de esta información, se identificó un total de 1,033 camellones en los 3 distritos mencionados, de los cuales se seleccionaron únicamente aquellos que presentaron cubierta arbórea, resultando en un conjunto de 179 camellones considerados para el estudio.

Selección de especies

A partir de los 179 camellones seleccionados (Figura 1) se hizo un conteo mediante recorridos de campo, en el que se identificaron las especies arbóreas con un total de 2,134 individuos. De este total, el 47.5% correspondió a diversas especies, entre ellas eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.), casuarina (*Casuarina equisetifolia* L.), araucaria (*Araucaria heterophylla* (Salisb.) Franco), álamo canadiense (*Populus × canadensis*), trueno (*Ligustrum lucidum* W.T. Aiton), mezquite (*Prosopis laevigata* (Willd.) M.C. Johnst.), ciprés (*Cupressus sempervirens* L.), jacaranda (*Jacaranda mimosifolia* D. Don) y pirul brasileño (*Schinus terebinthifolia* Raddi). El 52.5% restante estuvo conformado principalmente por laurel de la India (*Ficus microcarpa* L.f.), fresno (*Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh.) y pirul (*Schinus molle* L.). Estas tres últimas especies fueron seleccionadas como objeto de estudio por constituir el grupo mayoritario del arbolado registrado, superando en abundancia relativa a las demás especies identificadas.

Con base en dicho grupo mayoritario se contabilizó un total de 817 árboles, que a su vez se debieron seleccionar debido las condiciones de salud, afectaciones por manejo y acercamiento entre individuos. Así, los criterios fueron seleccionar ejemplares de etapa adulta, con fisonomía y salud aparentemente favorables, sin signos visibles de deterioro estructural, con copas completas sin interferencia entre individuos y afectación por manejo intensivo (desmoches) (Pokorny *et al.*, 2003; City of Shenandoah, 2006; Roberts *et al.*, 2006). Bajo estos criterios, resultó una muestra de 306 árboles, compuesta por 127 fresnos, 99 laureles de la India y 80 pirules. El tamaño de muestra fue de 133, 102 y 71 en ancho de camellón estrecho, mediano y amplio, respectivamente.

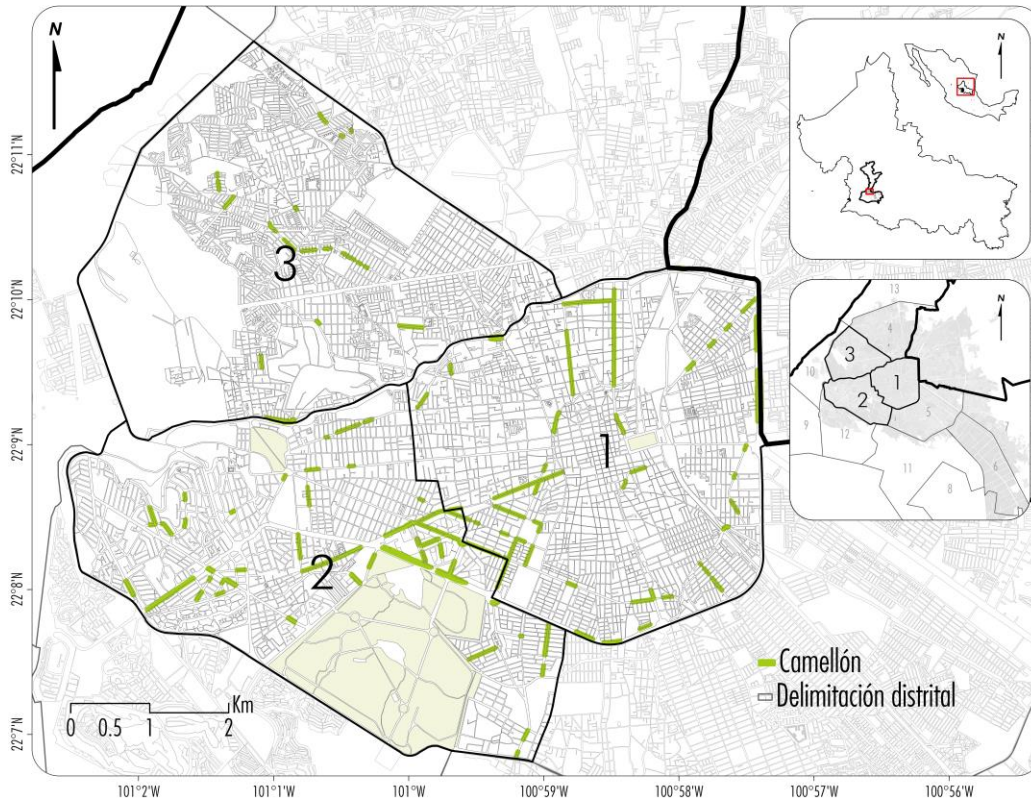


Figura 1. Ubicación de los sitios de estudio en camellón localizados en tres distritos de la ciudad de San Luis Potosí.
Figure 1. Location of the study sites on median strips in three districts of the city of San Luis Potosí.

Mediciones morfométricas

Una vez determinada la muestra de árboles en los distintos tratamientos de camellón, cada individuo fue georreferenciado en campo mediante un GPS eTrex 10 de la marca Garmin. De manera simultánea, se realizó la evaluación morfométrica de cada ejemplar, conforme a los criterios establecidos en la metodología del estudio y alineado con las pautas de (USDA Forest Service, 2021). para la estimación de servicios ambientales, las cuales requieren datos morfométricos arbóreos para obtener resultados precisos y representativos de los beneficios que ofrece el arbolado. En este sentido, se registraron las variables de diámetro normal o a la altura del pecho (DAP), la altura total del árbol (Aa), el área de proyección de copa (APC) y la altura de la base de la copa medida a 1.30 metros del suelo (ASC). Dichas variables son reconocidas en la literatura (Tan *et al.*, 2021; Amer *et al.*, 2023; Hintural *et al.*, 2024; Sharma *et al.*, 2025) como indicadores clave para evaluar la estructura del arbolado urbano y su capacidad para proporcionar servicios ambientales.

El DAP se midió con una cinta métrica alrededor del tronco y a la altura del pecho, cuyo cálculo se apoyó en Agriculture, Fisheries and Conservation Department (2006) mediante la siguiente fórmula:

$$D = c/\pi$$

donde D representa el DAP (cm), c corresponde a la circunferencia (cm) y π es el valor constante de 3.1416. En el caso de árboles con múltiples troncos esta variable se estimó mediante el cálculo de Swiecki y Bernhardt (2001) mediante la fórmula:

$$D = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}$$

donde D representa el diámetro total a la altura del pecho (DAP) del árbol, y d_1, d_2, \dots, d_n corresponden a los DAP individuales de cada tronco, medidos por separado. La altura de cada árbol se midió con un clinómetro de altura tangente (Forestry Suppliers, 2007). Para determinar la cobertura o diámetro de copa se empleó la proyección ortogonal, cuyo valor se basa en el grado de sombra vertical (Benavides-Meza y Young-Fernández Grandizo, 2012). Otra variable fue la altura del suelo a la copa, representada como la distancia vertical desde el suelo hasta el punto más bajo del follaje vivo de la copa. Si la base de la copa estuvo en contacto con el suelo se acepta la asignación de un valor cero de acuerdo con USDA Forest Service (2017) (Figura 2). La altura del suelo a la copa se utilizó exclusivamente para evaluar la estructura del árbol y los servicios ambientales asociados, los cuales se detallan más adelante.

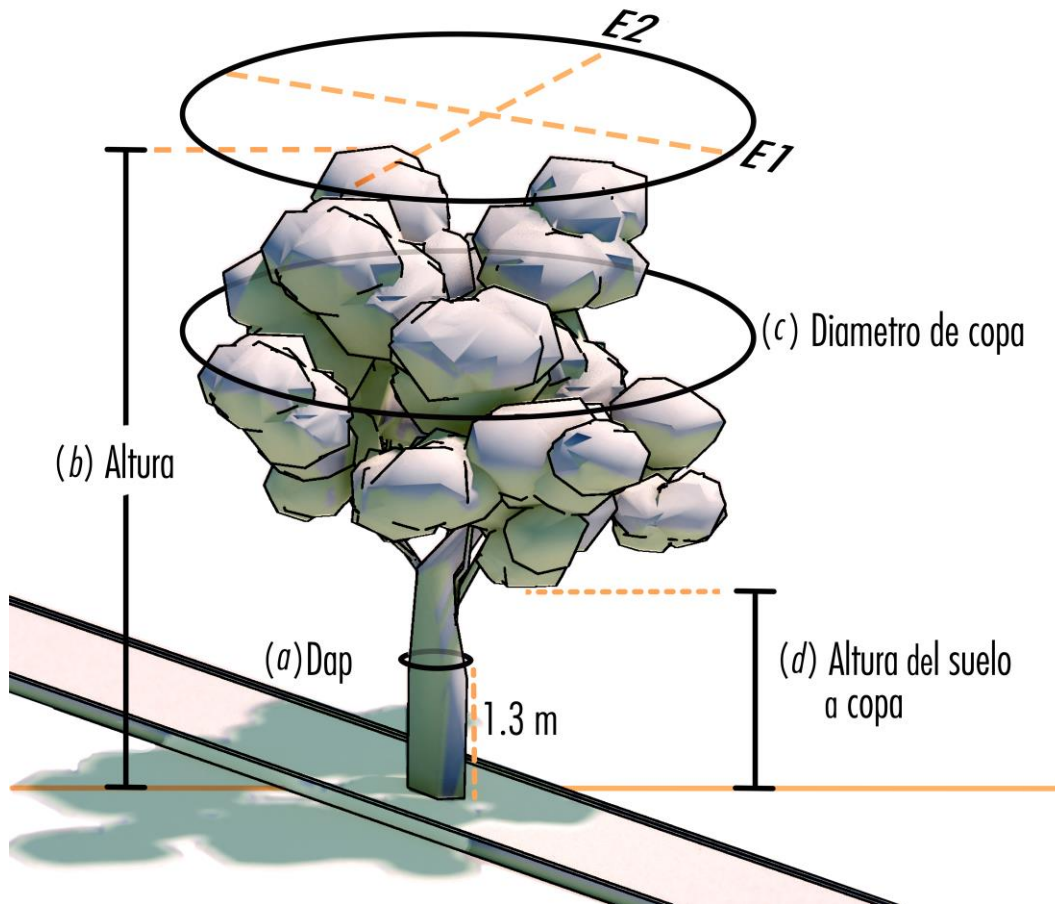


Figura 2. Medidas morfométricas realizadas a cada árbol de camellón.
Figure 2. Morphometric measurements taken for each tree on the median strip.

Con los datos morfométricos se hizo una evaluación entre datos de las variables para determinar relaciones entre sí y con el ancho de camellón. Esta evaluación incluyó gráficos de caja para valorar el DAP, Aa y APC de las tres especies de árboles, análisis de regresión lineal para determinar las relaciones entre tales variables, y gráficos de barras para comparar las medidas morfométricas según el tipo de ancho de camellón y especie.

Configuración urbana en relación con la morfometría

Para determinar el ancho de camellón se utilizó una cinta métrica de 50 m (marca Cadena, modelo FG 5001) cuyas medidas se agruparon en tres intervalos (≤ 1.8 m, $>1.8 - 5$ m, y >5 m) (Figura 3a). Para este valor se tomó la distancia entre paramentos de la calle y perpendicular a cada camellón, con el cual se determinó el ancho de calle. La medida de altura de los edificios se determinó a partir de la altura promedio de la altura de un piso. Este cálculo sirvió como medida base al considerar los edificios de uno o más pisos en sentido perpendicular al camellón. Se obtuvo este valor en ambos lados de la calle y después se calculó el promedio, por lo que este resultado fue el que se empleó en la relación altura de edificio - ancho de calle (AE-AC).

Para evaluar la orientación de las calles con los camellones se evaluó en grados decimales considerando el 0° como el Norte, mediante el programa Google Earth Pro. De esta manera, se definieron las cuatro direcciones Norte-Sur (N-S), Este-Oeste (E-O), Noreste-Suroeste (NE-SO) y Noroeste-Sureste (NO-SE) (Figura 3b). También, de acuerdo con la función dentro del sistema urbano (INEGI, 2013) se definieron las categorías de calles primaria, secundaria y terciaria. Las calles primarias o avenidas principales cumplen la función de arterias de mayor tránsito y facilitan la movilidad urbana. Las calles secundarias representan vialidades de menor tránsito que funcionan como conectores locales y las terciarias son de tránsito local, con acceso directo a las zonas residenciales y comerciales. Con base en estas categorías la relación AE-AC se estimó en ≤ 0.3 , $0.3 - 1$ y ≥ 1 para las calles primarias, secundarias y terciarias, respectivamente (Figura 3c). Por lo tanto, la configuración urbana se define por el ancho del camellón, el tipo y la orientación de la calle, así como la proporción AE-AC para cada especie estudiada. Las figuras resultantes reflejan los valores promedio más altos encontrados para cada variable morfométrica.

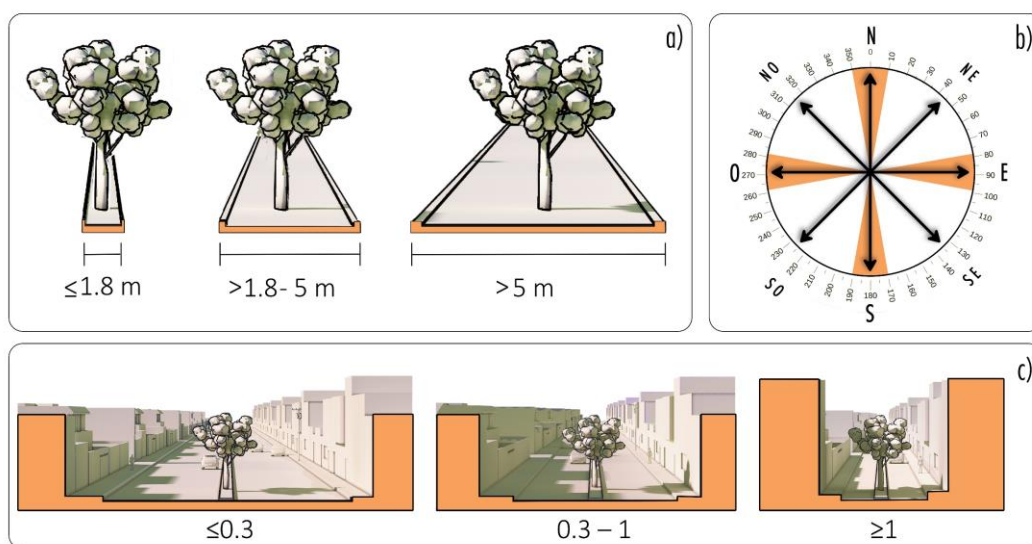


Figura 3. Categorías del ancho de camellón (a), la determinación de los cuatro tipos de orientación del camellón (b) y la relación altura de edificio – ancho de la calle (c).

Figure 3. Classification of median strip width categories (a), identification of the four types of median strip orientation (b), and the building height-to-street width ratio (c).

Valores ambientales y estimaciones a través de i-TREE eco

El software i-Tree Eco™ versión 6 se utilizó para cuantificar y modelar el valor ambiental y funcional del arbolado urbano a partir de los datos morfométricos recopilados. A través de este análisis se estimaron variables indirectas que reflejan la importancia y los servicios ambientales proporcionados por las especies estudiadas. A partir de esta herramienta se calculó el Valor de Importancia (VI), un índice que sintetiza la relevancia ecológica y estructural de cada especie

basado en su frecuencia, densidad y dominancia relativa. Otra variable estimada fue el Área Foliar (AF), que corresponde a la superficie total proyectada de las hojas expresada en metros cuadrados y que está relacionada con la capacidad fotosintética. Así mismo, se evaluó el Secuestro Bruto de Carbono (SBC), que representa la cantidad estimada de carbono fijado por los árboles en kilogramos por año, cuyo indicador es clave para determinar el servicio ambiental en cuanto a su mitigación. Estas variables fueron seleccionadas por su estrecha relación con la aportación ambiental del arbolado en la ciudad, particularmente en la vialidad, donde contribuyen a mejorar la calidad del aire, regular la temperatura y mitigar emisiones de carbono, favoreciendo así la sustentabilidad urbana.

Análisis estadístico

Para valorar las diferencias estadísticas entre las variables morfométricas (DAP, Aa y APC) y el ancho de camellón entre especies se utilizó el software libre RStudio™ versión 4.4.2. mediante un análisis de varianza (ANOVA). Además, se empleó una prueba pos-hoc de Tukey para determinar qué grupos presentaban diferencias significativas entre sí. Este análisis permitió identificar las relaciones y discrepancias específicas entre las especies estudiadas, proporcionando una base sólida para interpretar las variaciones en las variables morfométricas en función del ancho de camellón.

Para evaluar la relación entre las características morfométricas de los árboles (DAP, Aa y APC) y el ancho del camellón, se realizó un análisis de Escalado Multidimensional No Métrico (NMDS, por sus siglas en inglés) mediante el software libre RStudio. Este análisis empleó la distancia de Bray-Curtis para generar una matriz de disimilitud entre individuos, ajustando los datos en dos dimensiones ($k = 2$). Las coordenadas obtenidas del NMDS se asociaron a las especies de los árboles mediante una codificación por color. La visualización de los resultados se realizó con el paquete ggplot2, graficando los dos ejes principales (NMDS1 y NMDS2) y con elipses que reflejan la varianza dentro de cada grupo de especies. Este enfoque permitió identificar diferencias o similitudes en la morfometría de los árboles según su especie y el ancho del camellón, proporcionando una representación visual de los patrones de agrupación entre especies.

RESULTADOS

Variables morfométricas en función de la especie

El valor promedio del DAP más alto fue el de pirul (67.2 cm) y el menor de fresno (33.9 cm). No obstante, el rango intercuartílico más bajo resultó en fresno (23.9 a 40.5 cm) y el más alto en pirul (42.2 a 83.5 cm). Más allá de este rango se presentaron tres valores atípicos en fresno y uno en pirul (Figura 4a). En cuanto a la altura (Aa) el valor promedio más alto fue el del pirul con 12.5 m y el más bajo fue del fresno con 10.2 m. En estas mismas especies, el rango intercuartílico más alto fue del pirul (9.7 m a 15.2 m) y el más bajo del fresno (8.7 a 11.2 m), presentando seis valores atípicos en fresno fuera de este rango (4b). En la variable ACP el valor promedio más alto fue del pirul (193 m²) y el menor en fresno (95.5 m²), con un rango intercuartílico mayor (98.4 m² a 277 m²) y menor (13.9 m² a 194.4 m²), respectivamente. En este último parámetro, más allá del rango intercuartílico se presentaron seis y tres valores atípicos en fresno y laurel de la India, respectivamente (Figura 4c).

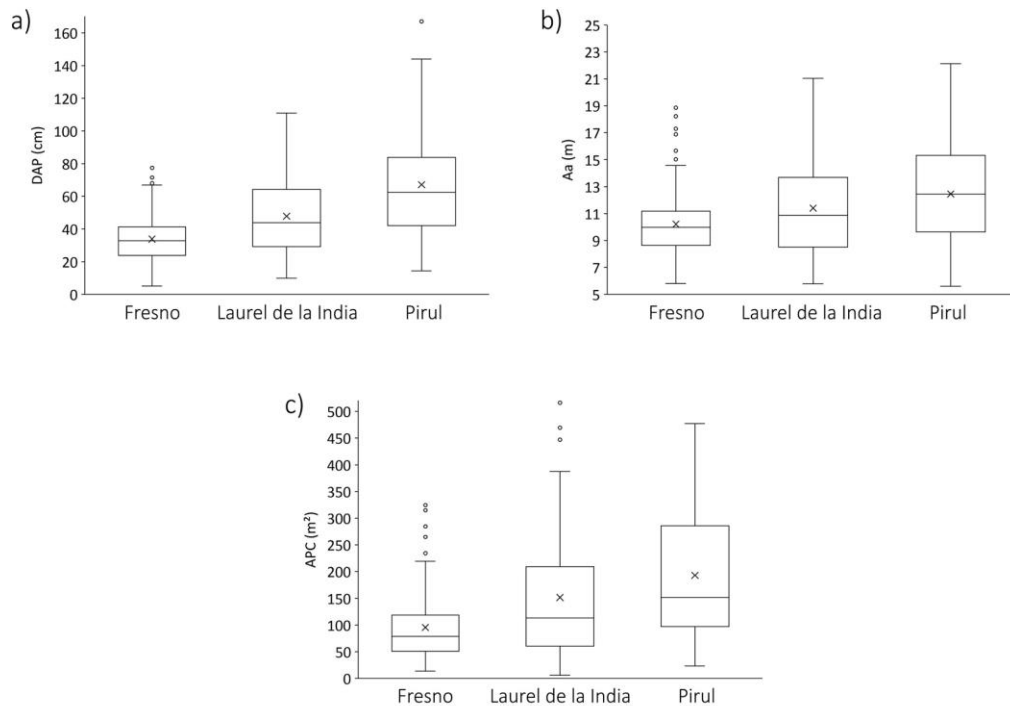


Figura 4. Variación del diámetro a la altura de pecho (DAP) (a), altura del árbol (Aa) (b) y área de proyección de copa (APC) (c) en las especies estudiadas.

Figure 4. Variation in diameter at breast height (DAP) (a), tree height (Aa) (b), and crown projection area (APC) (c) among the studied species.

En las pruebas de regresión lineal la fuerza de asociación entre Aa con DAP y APC con DAP no indicó resultados significativos en las tres especies. En tales pruebas la nube de puntos fue más compacta en fresno, pero más dispersa en las otras especies, por lo que la relación entre variables resultó débil para que los datos se ajusten a una línea recta (5a y 5b). Por el contrario, en la asociación entre APC y Aa, la respuesta de pirul indicó un R^2 de 0.74 ($F=2.2$, $P=0.00$) y valores de residuales simétricos en el análisis de varianza, lo que indica que el modelo fue significativo. En fresno y laurel de la India, si bien el valor de R^2 fue de 0.73 ($F=351.4$, $P=0.00$) y 0.75 ($F=293$, $P=0.00$), respectivamente, los residuales fueron asimétricos. Por lo tanto, la altura del árbol mostró proporcionalidad con el área de proyección de copa en fresno y laurel de la India, pero con una respuesta de menor significancia estadística (Figura 5c).

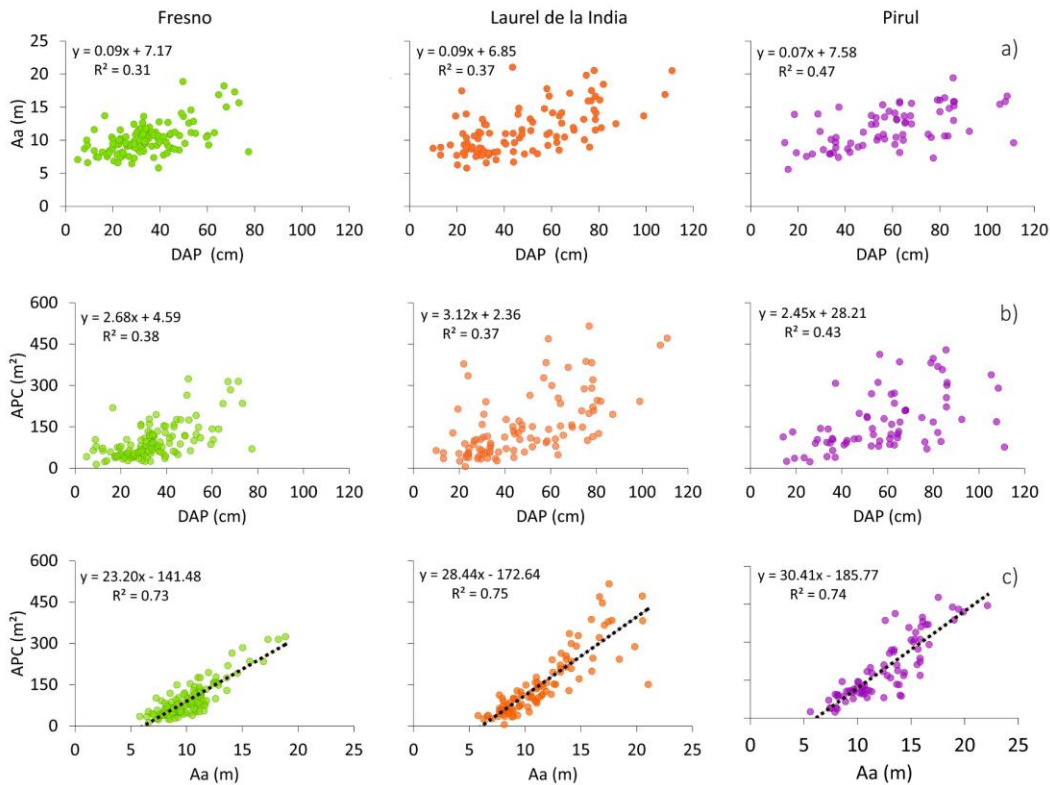


Figura 5. Regresión lineal de la altura del árbol y el DAP en (a), el área de proyección de copa y el DAP (b) y el área de proyección de copa con la altura del árbol (c) en fresno, laurel de la India y pirul.

Figure 5. Linear regression between tree height and DAP (a), crown projection area and DAP (b), and crown projection area and tree height (c) for ash, Indian laurel, and Peruvian pepper trees.

En cuanto a la variación de cada medida morfométrica en función de los tratamientos el pirul fue la especie con el valor más alto de DAP (75.3 cm) en el camellón estrecho. En esta especie el ANOVA mostró diferencias significativas entre todas las categorías de camellón ($F = 4.039$, $P = 0.021$) y para la prueba de Tukey fue significativo entre camellón mediano y amplio con respecto al estrecho ($P = 0.016$) y también entre el amplio con el estrecho ($P = 0.048$). En segundo lugar, el laurel de la India alcanzó un máximo de 56.5 cm en el camellón mediano, con diferencias significativas entre camellón mediano y estrecho ($p = 0.016$) en la prueba de Tukey. Por último, el valor más alto del fresno fue de 40.5 cm y sin significancia estadística entre los tres tipos de camellón. Estos resultados indican que la categoría camellón amplio y mediano fueron más favorables para pirul y laurel de la India, mientras que para fresno el DAP respondió de manera indistinta (Figura 6a).

De las tres especies el pirul alcanzó la altura de 13.4 m en camellón estrecho y laurel de la India de 12.2 m en camellón mediano. Ambos sin diferencias significativas en las respuestas entre las categorías de camellón. Por el contrario, el fresno obtuvo un valor máximo de 12.2 m en camellón amplio y esta respuesta fue estadísticamente diferente del camellón mediano y estrecho ($F = 6.379$, $P = 0.002$) en el ANOVA. Así mismo, en la prueba de Tukey el análisis mostró diferencias significativas entre camellón amplio y estrecho ($P = 0.004$) y también entre amplio y mediano ($P = 0.002$). La altura más baja fue de 9.9 m correspondiente a fresno en el camellón mediano. Estos resultados indican que, en las especies pirul y laurel de la India, la variación en el ancho del camellón no tiene un efecto significativo sobre la altura de los árboles. Sin embargo, en el caso

del fresno, sí se observa un efecto positivo, con mayores alturas registradas en el camellón amplio (Figura 6b).

En cuanto a área de copa el valor más alto fue de pirul con 207.6 m² en camellón amplio y en segundo lugar laurel de la India con 157.8 m² en el camellón mediano. Al no encontrar diferencias estadísticas en las pruebas sugiere que el ancho de camellón no tiene efecto la medida del APC en estas dos especies. Por el contrario, el ANOVA mostró diferencias significativas en los valores de fresno entre el camellón amplio con respecto a los demás ($F = 8.429$, $P < 0.001$) y Tukey entre el mediano y amplio ($P < 0.001$). En esta última especie el valor más alto fue de 156 m² en camellón amplio. Por lo tanto, una mayor dimensión del camellón si puede influir positivamente en el APC de fresno (Figura 6c).

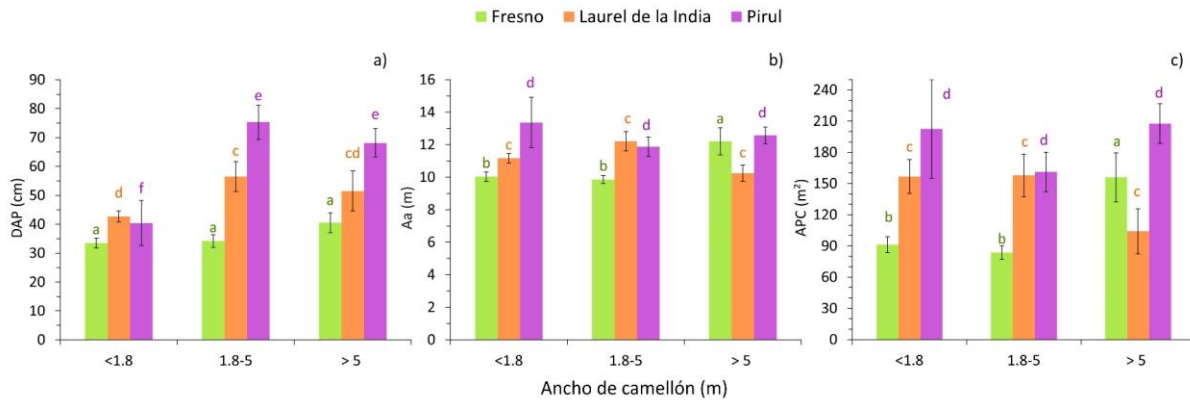


Figura 6. Variación del DAP (a), Aa (b) y APC (c) según las tres categorías de ancho del camellón. Las letras sobre las barras indican diferencias estadísticas entre las de medias, realizadas dentro de cada especie para cada variable, sin realizar comparaciones entre especies.

Figure 6. Variation in DAP (a), Aa (b), and APC (c) according to the three median strip width categories. Letters above the bars indicate statistically significant differences between means, assessed within each species for each variable, without comparisons across species.

Situación del arbolado en función de la configuración urbana

De acuerdo con la Figura 7 se muestra la situación del arbolado en camellón por especie en relación con la configuración urbana. El pirul mostró hasta tres variedades de configuración urbana, dos en laurel de la India y una sola para fresno. En esta última especie, y de acuerdo con los valores promedio de 41.7 cm de DAP, 12.7 m de Aa y 165 m² de APC, los árboles se encontraron preferentemente en una sola situación. Estos valores sobre la situación del fresno reflejaron una orientación noreste-suroeste, una proporción AE-AC menor a 0.3, por lo general de tipo terciarias y ancho de camellón amplio. En laurel de la India, con 65.9 cm de DAP, 14.4 m de Aa y 283.4 m² de APC, la situación se definió en dos tipos de calle. La primera fue orientación noreste-suroeste, proporción AE-AC menor a 0.3, de tipo secundaria y con ancho de camellón estrecho. La segunda resultó con orientación este-oeste, un intervalo de 0.3 a 1 en la proporción AE-AC, en calle secundaria y con ancho de camellón mediano. Por último, en pirul y con valores de 103.6 cm de DAP, 14.3 m de Aa y 259.3 m² de APC la situación resultó en tres variedades. En la primera, la orientación fue noreste-suroeste, con 0.3 a 1 de proporción AE-AC, calle primaria y camellón amplio. En la segunda variedad de situación fue de orientación y proporción iguales que la primera, pero con calle terciaria y de camellón estrecho. La última variedad para pirul fue de orientación norte-sur, con 0.3 de proporción AL, en calle primaria y camellón mediano (Figura 7).

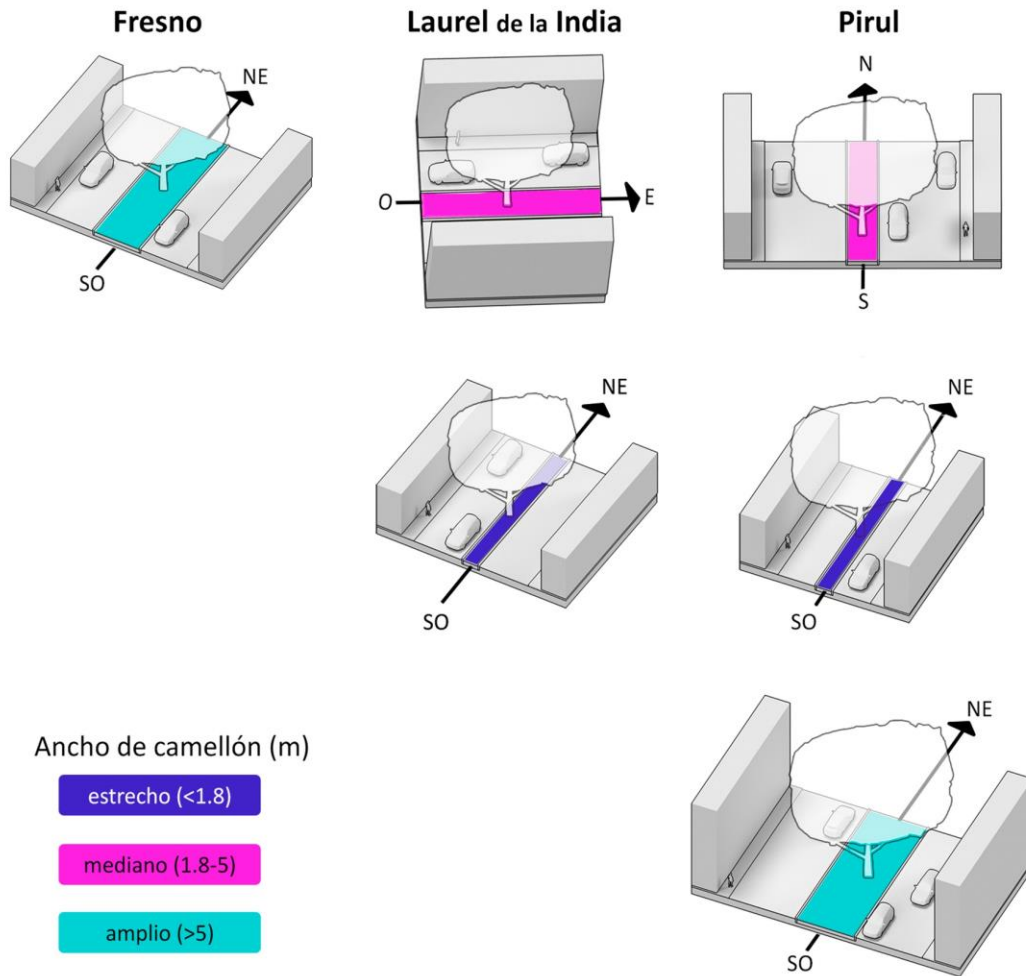


Figura 7. Situación del arbolado en camellón basados en el promedio máximo de DAP, Aa y APC por especie en función de la orientación, la proporción AE-AC y el tipo de vialidad.

Figure 7. Tree placement in median strips based on the maximum average DAP, Aa and APC per species, as a function of orientation, the proportion AE-AC and type of roadway.

Valores estimados mediante i-TREE Eco

De acuerdo con los valores estimados de i-TREE Eco la especie con mayor VI fue la de fresno con 70.8, después laurel de la India con 65.5 y pirul con 63.8. Al evaluar este parámetro en función del ancho de camellón el valor más alto fue laurel de la India con 39.9 y después fresno con 36.7, ambos en camellón estrecho, y por último pirul con 39 en camellón amplio (Figura 8a). Sobre el AF, el valor promedio más alto resultó en pirul con 236.2 m², le sigue el laurel de la India con 168 m² y por último el fresno con 115.8 m². En la variación de acuerdo con las categorías de camellón el pirul registró el mayor AF (252.6 m²) en el camellón amplio y laurel de la India 181.4 m² en el camellón estrecho. En fresno, el valor más alto de AF fue de 145.4 m² en el camellón amplio. De esta manera, en AF destacó el pirul con el valor más alto de AF en todas las categorías de camellón y entre todas las especies, mientras que el fresno resultó con las estimaciones más bajas (Figura 8b). Acerca del SBC la especie con mayor respuesta fue el fresno al alcanzar un valor de 10.2 kg/año, después le sigue el laurel de la india con 4.9 kg/año y por último el pirul con 3.4 kg/año. En cuanto a la respuesta por sitio el fresno alcanzó 12.6 kg/año en el camellón amplio, que fue significativamente mayor que en los demás camellones y también

con respecto a las demás especies. Como segundo lugar se encuentra el laurel de la India con 6.4 kg/año en el camellón amplio y pirul con 4 kg/año en el mediano, pero sin diferenciación estadística en la muestra de datos por especie (Figura 8c).

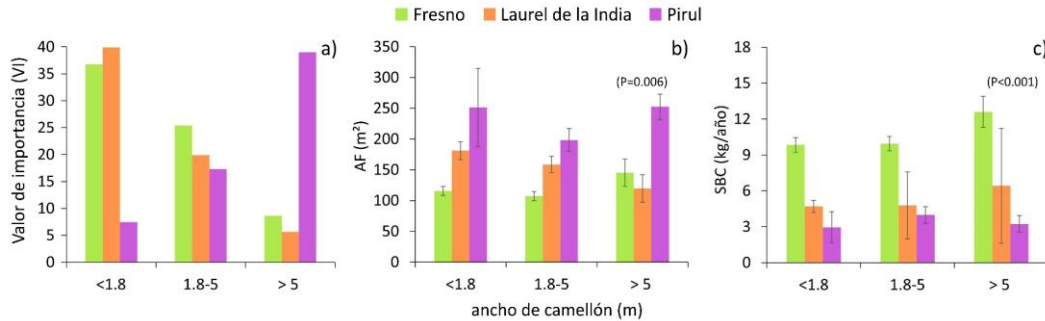


Figura 8. Valores promedio del valor de importancia (VI; a), área foliar (AF; b) y secuestro de carbono bruto (SBC; c) estimados a partir de I-TREE Eco en las tres especies de árboles estudiadas en función de las tres categorías de ancho de camellón.

Figure 8. Average values of importance value (VI; a), leaf area (AF; b), and gross carbon sequestration (SBC; c) estimated using i-Tree Eco for the three tree species studied, according to the three median strip width categories.

Análisis Escalado Multidimensional No Métrico

Los resultados del análisis NMDS indicaron que no hay variación significativa en la morfometría del arbolado en función del ancho del camellón, ya que los puntos correspondientes a las tres especies se solapan ampliamente en el espacio definido por los ejes NMDS1 y NMDS2 (0.054). Los ejemplares de fresno y laurel de la India se agrupan predominantemente cerca del centro de la gráfica (cercanos a 0 en ambos ejes). Esto sugiere que sus características morfométricas son similares y que el ancho del camellón no tiene una influencia significativa en ellas. Los ejemplares del pirul exhiben un ligero cambio en la distribución, con algunos puntos desplazados hacia la región inferior de la gráfica (valores negativos en NMDS2), lo que indica un efecto menor y negativo del ancho del camellón sobre su morfometría. Sin embargo, en general, no se observa evidencia significativa que agrupe la morfometría de las especies de árboles según el ancho del camellón, como lo refleja el solapamiento general de los puntos en el espacio NMDS (Figura 9).

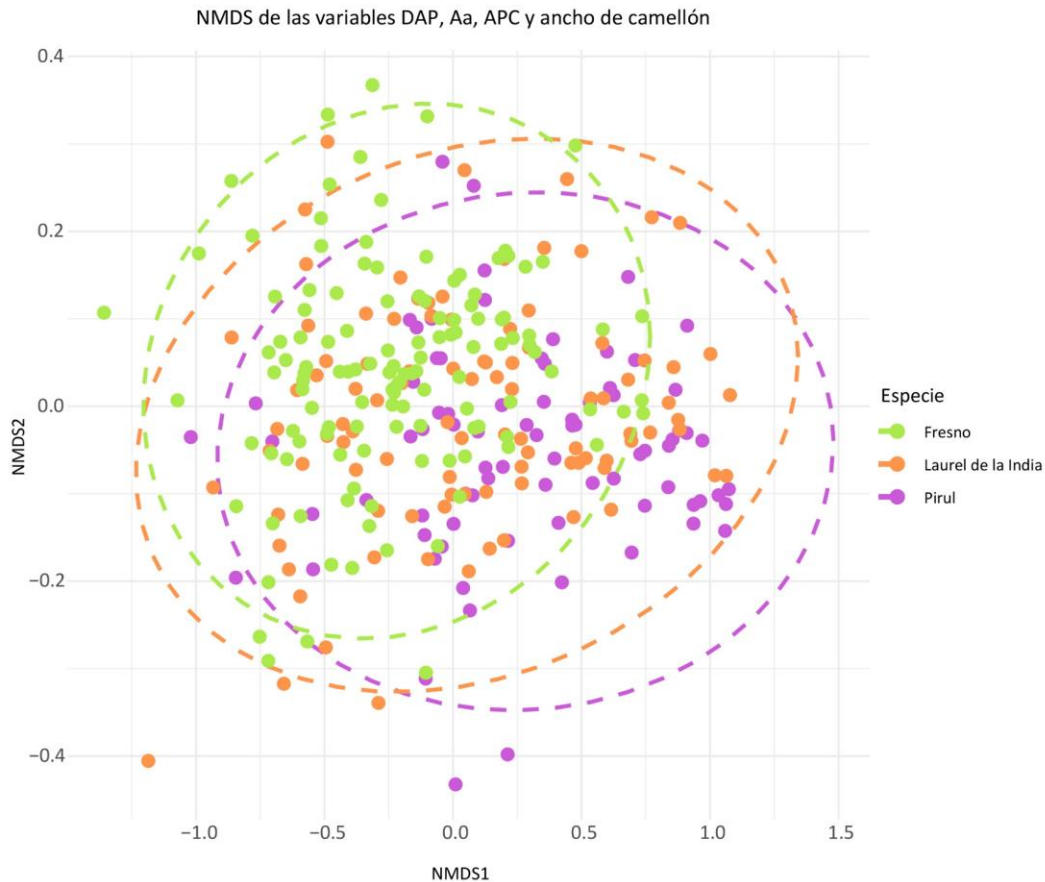


Figura 9. Gráfica del NMDS entre las relaciones entre las variables DAP (cm), Aa (m), APC (m²) y ancho del camellón (m).
Figure 9. NMDS plot showing the relationships among DAP (cm), Aa (m), APC (m²) and median strip width (m).

DISCUSIÓN

Variables morfométricas en función de la especie

Los valores promedio más altos del pirul en DAP, altura y área de proyección de copa, en comparación con el laurel de la India y fresno pueden deberse a algunos factores relacionados con las condiciones del ambiente. Probablemente, las condiciones son más adecuadas para el crecimiento del pirul en relación con las demás especies, debido a su mayor capacidad de adaptación a espacios restringidos, lo que explica su ventaja en las variables observadas. En otros estudios, se ha documentado que las características biológicas y los factores ambientales del hábitat en calles pueden ser más favorables para unas especies en relación con otras. Por ejemplo, en el trabajo de Stoffberg *et al.* (2008) destacan la altura y diámetro de copa en *Combretum erythrophyllum*, *Searsia lancea* y *Searsia penduline*. También, Dahlhausen *et al.* (2016) indican que los árboles de *Araucaria cunninghamii*, *Khaya senegalensis* y *Quercus nigra* sobresalieron en cuanto al DAP, altura del árbol y radio de copa, entre otras especies. Así mismo, Yang *et al.* (2023) señala que algunas especies como *Ginkgo biloba*, *Koelreuteria paniculata*, y *Populus spp.* mostraron un mayor DAP, altura del árbol y dimensiones en general de copa en comparación con otras especies.

Algunos de los factores extrínsecos a la especie como los recursos disponibles también son de relevancia para determinar el desarrollo de una especie de árbol, como el caso del pirul. Uno de los recursos de peso puede ser el agua disponible para los árboles, especialmente en condiciones de espacios urbanos. Cabe señalar que en el presente estudio el suministro de riego no fue parte

de los programas de mantenimiento por parte del gobierno municipal. Por ejemplo, de acuerdo con McPherson *et al.* (2016) las prácticas de manejo como el riego pueden influir significativamente en el desarrollo arbóreo, especialmente en el tamaño de la copa. Por tanto, es posible que la ausencia de riego en los árboles estudiados puede estar asociada con una necesidad hídrica mayor en los ejemplares de climas templados y tropicales, como es el caso del fresno y el laurel de la India, respectivamente.

Si bien los tres árboles estudiados son de porte grande es importante notar que se trata de especies de diferente situación climática y también de variación morfométrica distinta. Otro factor que debemos señalar es la diferencia en el tamaño de muestra por especie, por ejemplo, lo que indicó las variaciones morfométricas en los gráficos de cajas y bigotes. No obstante, a pesar del tamaño de muestra del pirul solo se presentó un valor fuera de la caja y bigote del DAP y tres del laurel de la India en el área de proyección de copa. Mientras tanto, en fresno fueron tres, seis y cinco valores fuera de las cajas y bigotes en DAP, área de proyección de copa y altura, respectivamente. En relación con esto, las circunstancias de los árboles urbanos pueden generar tales diferencias en el análisis de los tamaños de muestra entre especies. Pretzsch *et al.* (2015) señala que en muestras de 26 árboles como mínimo puede ser suficiente para analizar la morfometría como el DAP o la altura del arbolado.

Relaciones alométricas

De acuerdo con el análisis de regresión lineal la respuesta significativa fue entre el área de proyección de copa y la altura del árbol en las tres especies, como muestra la Figura 5c. Si bien este resultado mostró una relación significativa en las tres especies solo en pirul los residuales fueron simétricos, lo que sugiere que el modelo explica de mejor manera la relación alométrica en la especie. A pesar de ser significativa la relación entre altura y área de proyección de copa en fresno y laurel de la India, los residuales asimétricos sugieren mayor variabilidad en las medidas de copa o alturas de ciertos ejemplares. Entre algunos factores pueden mencionarse las mismas fluctuaciones en crecimiento que presentan los árboles urbanos, en específico los que se establecen en vialidades. No obstante, en el presente estudio la relación significativa entre altura del árbol y área de proyección de copa también es observable en las proporciones alométricas reportadas en árboles urbanos (Vaz Monteiro *et al.*, 2016, Chatziathanasiou *et al.* 2023; 2024, Lin, *et al* 2024).

Para el análisis de regresión lineal entre altura de árbol con DAP y entre área de proyección de copa con DAP los resultados fueron no significativos en las tres especies. Esto puede indicar una desproporción de crecimiento entre el ancho del tronco y la altura del árbol o la dimensión de la copa. En los valores de la Figura 5a y 5b se muestra la no linealidad de los datos en los gráficos de las pruebas de regresión. Por lo tanto, el DAP para los árboles urbanos evaluados no mostró una relación alométrica habitual en el presente estudio. La falta de relación en los resultados entre DAP y las otras dos variables podrían indicar algún tipo de descompensación en el crecimiento en grosor o insuficiencia en la biomasa del tronco. Esto puede reflejar que en los árboles urbanos de vialidad redirijan la energía para el crecimiento de copa y altura en vez de aumentar la biomasa en términos del grosor del tronco. Aunque se requieren más estudios para demostrar dicho efecto en la respuesta del DAP un trabajo urbano relacionado puede sugerir algún aspecto en común. Hui *et al.*, (2020) indica que los árboles al borde de carretera pueden alterar su patrón de crecimiento por estar en espacio limitado y baja calidad del suelo para el desarrollo de sus raíces. Esto puede disminuir la fuerza de asociación entre la altura y el DAP en comparación con árboles de espacios verdes abiertos, donde el crecimiento y las relaciones alométricas suelen ser más favorables. Incluso, en un estudio sobre árboles urbanos de *Ficus* la falta de relación alométrica y variación morfológica se puede atribuir a limitaciones de espacio y del hábitat (Lin *et al.*, 2024). Además de tales circunstancias es probable que las copas de muchos tipos de árboles en calles se vean modificadas no por un evento de poda como tal, sino por la interferencia de diferentes agentes urbanos como el paso y roce de vehículos automotores de diferente tamaño. Por ejemplo, el tamaño de muestra de laurel de la India pudo haber sido mayor en ejemplares aislados de no ser por este efecto de modificación de copa.

Morfometría en relación con el ancho de camellón

De acuerdo con los resultados destacan los valores de DAP en pirul y laurel de la India, favorablemente en camellón mediano y amplio, mientras que en fresno la respuesta fue reducida y sin efecto alguno de acuerdo con el ancho de camellón. Es posible que en pirul y laurel de la India el espacio estrecho de un camellón pueda tener un efecto desfavorable en la respuesta del DAP y en fresno una respuesta indistinta. Aunque la literatura especializada de árboles urbanos no se ha documentado los efectos de las vialidades y camellones en la morfometría arbórea la explicación de estos resultados puede remitirse a ciertas observaciones. Este resultado del DAP también puede relacionarse con el hecho de que pirul y laurel de la India son dos árboles dominantes en cualquier tipo de espacio verde de la ciudad. Sin embargo, los ejemplares de fresno con mayor altura y DAP aparente se encuentran en situación de banqueta amplia (5 m) en una vialidad primaria de la ciudad. Esto puede sugerir que el crecimiento del fresno probablemente esté restringido a espacios de mayor extensión en el área verde de una calle. En una publicación de divulgación de la ciudad de San Luis Potosí, los árboles de porte grande más abundantes se encuentran asociados a franjas verdes de banquetas mayores a 3 m (Ramos-Palacios, 2019). Si bien las referencias sobre este resultado son del espacio de banqueta se puede tomar como un punto de referencia cualitativo en el espacio de vialidad, aunque no se trate del área de camellón. No obstante, las diferencias significativas en el DAP entre especies también pueden estar asociadas a sus particularidades morfológicas (Fatimah *et al.*, 2024; Peper *et al.*, 2001).

Si bien la altura de los árboles en pirul y laurel de la India no indicó una diferencia marcada entre los diferentes anchos de camellón se puede decir que el efecto es indistinto en ambas especies. Por el contrario, el efecto del camellón amplio se distinguió en la altura de los árboles de fresno, por lo que solo en esta especie parece importante el efecto de las dimensiones de esta área verde de calle. Aunque la literatura sobre la altura de árboles en calles es escasa, especialmente en áreas de camellón se pueden considerar trabajos bajo un contexto comparable. Sanders y Grabosky (2014) señalan que el tamaño y la configuración de las franjas de plantación pueden influir significativamente en el crecimiento de los árboles en espacios de estacionamiento 20 años después de su establecimiento. Tales autores indican que un aumento en el área de plantación está asociado con un mayor tamaño de los árboles después de un periodo de 18 a 23 años de crecimiento.

Sobre la respuesta del área de copa proyectada los árboles de pirul y de laurel de la India no parecen tener efecto alguno por la variación del ancho de camellón, aunque los valores de la primera especie fueron mayores que la segunda. Por el contrario, la respuesta de fresno, claramente mayor en el camellón amplio, por lo que la amplitud de la copa fue más favorable en esta condición espacial. Estos resultados sugieren que una superficie mayor de camellón es más favorable para la altura y copa del fresno, pero indistinto para los árboles de pirul y laurel de la India. Por lo tanto, el fresno muestra una mayor dependencia del espacio disponible en el camellón para el desarrollo de su altura y copa, a diferencia del pirul y el laurel de la India, cuyas dimensiones no parecen estar condicionadas por estas variables.

Es importante señalar que, durante el muestreo de datos, el fresno y laurel de la India mostraron brotes epicórmicos en la ramificación. Esto supone algún efecto de poda de sus copas en el pasado lejano, a pesar de su aparente falta de alteración en la selección de individuos evaluados. Al considerarse esta posibilidad es probable que tales especies sean más susceptibles a recibir manejo en situación de camellón que el pirul. Otro factor probable es la adaptación que esta especie tiene en un medio deficiente de espacio y recursos. Según Ramírez-Albores *et al.* (2015) el pirul en etapa adulta es capaz de aprovechar de manera eficiente el agua, la luz y los minerales, incluso en suelo alterados o compactados. Además, al inhibir el establecimiento de otras especies circundantes debido a su capacidad alelopática se reduce la competencia por los recursos y esto favorece su crecimiento.

Situación del arbolado en función de la configuración urbana

Aunque la traza urbana ofrece diferentes orientaciones de calles las especies evaluadas a partir de los promedios de morfometría preferentemente se localizaron en la orientación noreste-suroeste. Así, excepto la orientación este-oeste de laurel de la India y norte-sur de pirul la mayoría

de los árboles mostraron resultados más favorables en la noreste-suroeste. Esto puede obedecer a que los árboles en orientación noreste-suroeste la radiación solar adquirida la reciban sea intermedia en lugar de una condición de mayor exposición a lo largo del día en este-oeste o casi nula en la norte-sur. Por lo tanto, estas condiciones ambientales sí pudieron afectar la muestra de árboles estudiados. Por otro lado, este efecto puede estar relacionado con las condiciones microclimáticas de las calles, pero también con la optimización de la absorción solar y el sombreado de los árboles de acuerdo con diferentes estudios (Bourbia y Boucheriba, 2010; Ahmadi Chatzidimitriou y Axarli, 2017; Venhari *et al.*, 2019).

Por otro lado, los resultados indican que los árboles evaluados se localizan en la proporción altura de edificio – ancho de calle (AE-AC) menor a 0.3 o de 0.3 a 1, es decir en las calles angostas con edificios altos no se localizaron árboles de camellón. Cabe mencionar que este tipo de calles mantiene arbolado en camellón, pero los ejemplares no fueron parte del estudio. Si bien la ciudad se encuentra en una región con alta frecuencia de horas de insolación anual y pocos días nublados la morfología de los árboles fue favorable en calles amplias y con edificios bajo. A pesar de la alta exposición a los rayos solares es probable que estas características en los árboles se compensen por su ubicación en calles con orientación noreste-suroeste, preferentemente, como se mencionó arriba.

Además, de acuerdo con el promedio de las variables morfométricas evaluadas, los árboles de las tres especies se localizaron preferencialmente en calles secundarias, después en terciarias y al final en primarias. Al evaluar con respecto a la especie, el fresno se encontró fundamentalmente en calles secundarias y menos en terciarias, pirul más en primarias que en terciarias y laurel de la India solo en terciarias. Esta observación cualitativa puede indicar la adaptación de los árboles al grado de tránsito vehicular por el tipo de calle. Así, los árboles de pirul y fresno fueron más tolerantes a las calles primarias de alto tránsito vehicular y las secundarias de mediano tránsito, respectivamente. Con respecto a laurel de la India los árboles tuvieron un mejor desempeño morfológico a las calles de tipo secundarias. Esto significa que los árboles presentaron, en su mayoría, signos de morfología favorable en calles de mediano tránsito vehicular.

Por lo tanto, en términos morfométricos los árboles de laurel de la India mostraron valores más altos en camellones estrechos y medios en comparación con lo encontrado en fresno. Aunque los resultados en laurel de la India fueron favorables en estos dos tipos de camellón por lo general esta especie requiere de espacios amplios para su desarrollo, además de tomar esto en cuenta para toda propuesta al planear las plantaciones urbanas. En contraste, mientras el fresno mostró mejor desempeño morfométrico en camellones amplios en pirul la respuesta fue indistinta, es decir que se desarrolló bien en las tres categorías de camellón. Esto puede indicar una amplia plasticidad espacial y morfológica del pirul a los diferentes anchos de camellón. Se puede decir que el pirul fue la especie cuya morfología y dimensiones se pueden adaptar de manera favorable a las condiciones de camellón sin importar la amplitud del mismo. En este mismo orden el laurel de la India resultó con una adaptación media, en la que su morfometría se favorece incluso en los camellones estrechos. En contraste, la morfología del fresno requiere de espacios amplios de camellón, por lo que esta especie muestra mayores restricciones espaciales y ambientales. La utilidad de este tipo de resultados puede incidir en los proyectos de diseño y planeación urbana. En un estudio sobre la configuración de calles en relación con el arbolado urbano en Grecia, Rantzoudí y Georgi, (2017) identificaron que los árboles de gran porte son particularmente adecuados para espacios de camellón de 30 m de ancho con orientación este-oeste, ya que favorecen las condiciones bioclimáticas y proporcionan un mayor sombreado. En otra investigación se precisa la relevancia de una fila central de árboles en calles con cierta orientación y proporción altura de edificio – ancho de calle al aprovechar la máxima radiación solar y producir sombreado varias horas del día (Mballo *et al.*, 2021).

La configuración urbana regula el microclima y la disposición del arbolado, aspectos clave para evaluar sus beneficios ambientales. En un meta-análisis se indica que los efectos de enfriamiento de los árboles urbanos son más significativos cuando se tienen en cuenta las características de la configuración urbana y el clima local (Li *et al.*, 2024). Esto viene determinado por las condiciones del clima urbano y en específico de la zona climática local de acuerdo con su composición y área en la ciudad (Stewart y Oke, 2012). Aunque tales estudios abordan la relación entre el arbolado

y la configuración urbana, son pocos los que se centran específicamente en cómo las características físicas de la calle influyen directamente en el desarrollo de los árboles urbanos. Por lo general, los diferentes estudios se enfocan en el efecto contrario, es decir en cómo las propiedades del arbolado impactan en el entorno urbano. Esto puede generar un vacío en como la orientación, el ancho de camellón y tipo de calle influyen en el crecimiento y características morfométricas de los árboles, por lo que se torna difícil la comparación con investigaciones previas.

Valores indirectos estimados en i-TREE Eco

Los resultados obtenidos a partir de la estimación de i-TREE Eco muestran que el fresno presentó un valor de importancia más alto y pirul el valor más bajo. El valor de importancia mide la relevancia de una especie arbórea en la ciudad según su cantidad de ejemplares y área foliar, reflejando su aporte a los servicios ambientales. Como lo reporta Hernández-López *et al.*, (2023), la presencia de *F. uhdei* con un alto valor de importancia es un aspecto positivo, ya que se trata de una especie nativa de México. El uso de especies nativas es altamente recomendado debido a sus ventajas en términos de adaptación al entorno y mejor desempeño en crecimiento.

Por otro lado, se observó que el pirul fue la especie de mayor promedio de área foliar y el fresno la de menor valor en el presente estudio. Estas diferencias pueden estar asociadas con las características morfológicas foliares propias de cada especie. El pirul posee hojas compuestas con 20 a 40 foliolos que miden entre 2 y 5 cm de largo (Martínez-Millán y Cevallos-Ferriz, 2005), mientras en el fresno tiene hojas compuestas de 5 a 9 foliolos con una longitud de 15 a 30 cm (Pasicznik, 2022). Esto puede indicar que a pesar de lo pequeño de sus hojas el pirul tiene mayor unidad de área foliar que las hojas de fresno, ya que estas últimas son más amplias y largas.

El desarrollo foliar de un árbol varía según su grado de adaptación al entorno, reflejando ajustes en su estructura morfológica. Según señala Ramírez-Albores y Badano (2013), el pirul se establece naturalmente en climas secos y semiáridos y ha sido catalogada en México como una especie oportunista, capaz de colonizar rápidamente áreas alteradas por actividades humanas. Asimismo, Pires *et al.*, (2015) observaron que las hojas de esta especie presentan características escleromórficas en las posiciones superiores de la copa, lo que les confiere una notable adaptación a entornos con alta radiación solar y escasa disponibilidad de agua. Además, documentaron que el pirul tolera ciertas concentraciones de contaminantes, lo que se refleja en la formación de hojas más gruesas y resistentes (Pereira *et al.*, 2016).

En relación con los resultados del laurel de la India, aunque su área foliar es menor en comparación con el pirul, supera la del fresno, por lo que esta especie puede resultar de gran utilidad por su capacidad de sombreado. Un estudio en Guangzhou reveló que el laurel de la India alcanzó hasta un 91.9% de densidad del dosel y por lo tanto mayor proporción de humedad y capacidad de refrescar el ambiente en relación con otras especies arbóreas de la ciudad (Feng *et al.*, 2023). Los resultados sobre el área foliar son especialmente relevantes en el contexto urbano, ya que permiten inferir las ventajas ambientales del arbolado urbano. Según Livesley *et al.*, (2016), los beneficios ambientales están estrechamente vinculados a la superficie foliar, la cual depende directamente del tamaño y del crecimiento vegetativo. Así mismo, todo el conjunto de hojas que comprende una copa tiene la capacidad de mitigar las altas temperaturas del aire hasta en un 60% de varias especies de árboles (Morakinyo *et al.*, 2018). Incluso el fresno, cuyo valor de área foliar fue menor, es una especie con propiedades ambientales importantes al mostrar un potencial transpirativo y ecofisiológico eficiente como árbol urbano (Ballinas y Barradas, 2016; Barradas *et al.*, 2016).

En cuanto al secuestro bruto de carbono, el fresno resultó con el valor promedio más alto entre las especies estudiadas y de menor valor en pirul. En fresno (*Fraxinus uhdei*) las amplias reservas de carbohidratos le permiten recuperarse de múltiples eventos de defoliación, por lo que el secuestro de carbono resulta favorable y más estable, incluso en condiciones ambientales no ideales (Gleason y Ares, 2004). Además, al ser semicaducifolia la especie de fresno puede presentar renuevos y brotes foliares que incrementen la absorción del bióxido de carbono atmosférico.

Los árboles en entornos urbanos contribuyen a la disminución del bióxido de carbono en la atmósfera para mitigar el cambio climático a nivel local. La eficacia de este proceso varía según la especie arbórea (Ajayi, 2021; Du *et al.*, 2024), incluso en un estudio señalan el alto potencial de las especies nativas para el secuestro de carbono (Vasagadekar *et al.*, 2023). Además, para maximizar el secuestro de carbono, es necesaria una gestión estratégica y la expansión de la infraestructura verde en las zonas urbanas (Kim *et al.*, 2024; Rasoolzadeh *et al.*, 2024).

El arbolado urbano en las calles desempeña un papel crucial en el secuestro de carbono, contribuyendo a la reducción de las emisiones de CO₂ en las ciudades. Sin embargo, este beneficio puede verse limitado por factores antropogénicos. Según (Guo *et al.*, 2024), la poda inapropiada y la falta de un mantenimiento adecuado de los árboles en las vialidades pueden reducir su eficacia en la captura de carbono. Además, al tratarse de árboles ubicados en calles, las dimensiones diamétricas y de altura tienden a modificarse, lo que repercute de manera directa en su capacidad para capturar carbono (Osseni *et al.*, 2022). Según Drolen *et al.* (2023), los árboles en calle con alta capacidad de crecimiento, mayor follaje y baja mortalidad son más eficientes en secuestrar carbono. Estos pueden lograr su máximo potencial a una densidad baja, lo que optimiza la gestión del arbolado urbano al requerir menos árboles para obtener un mayor beneficio en captura de carbono.

Análisis Escalado Multidimensional No Métrico

Los resultados obtenidos a partir del análisis NMDS indican que no se encontró una variación significativa en la morfometría del arbolado urbano en función del ancho del camellón. Esto se refleja en el amplio solapamiento de los puntos que representan a las tres especies de árboles analizadas en el espacio definido por los ejes NMDS1 y NMDS2. Los resultados indican que la mayoría de los ejemplares se agrupan cerca del centro de la gráfica, lo que sugiere que sus características morfométricas no están fuertemente influenciadas por el ancho del camellón. Sin embargo, el desplazamiento del fresno hacia la parte superior izquierda sugiere un posible efecto del ancho de camellón sobre su morfometría, lo que podría estar relacionado con restricciones en el espacio disponible para su desarrollo. En contraste, los ejemplares de pirul presentan un ligero desplazamiento hacia valores negativos en el eje NMDS2, lo que puede decir que el ancho del camellón tiene una menor influencia en su morfometría, posiblemente debido a su mayor adaptación a condiciones limitantes del espacio.

Los resultados del análisis NMDS pueden mostrar diferencias debido a las diversas variaciones en el entorno urbano. Además, las condiciones ambientales y la configuración del espacio urbano podrían estar influyendo de manera distinta en el crecimiento y morfología de las especies. En el presente estudio las respuestas por variable morfométrica señalaron diferencias entre las especies, sin embargo, en el análisis NMDS la combinación de las dimensiones a partir de la interacción entre variables no mostró diferencias entre las tres especies. Esto no necesariamente es contradictorio, más bien indica que tanto la respuesta morfométrica como el efecto de camellón no resultaron de estadísticamente favorables para el NMDS. Según Alberti *et al.*, (2020), los paisajes urbanos muestran una heterogeneidad única debido a la combinación de elementos naturales y diseñados. Este mismo autor señala que los árboles urbanos son un claro ejemplo del patrón emergente en la ciudad, que se desarrollan de manera desigual debido a factores naturales y humanos.

Por lo tanto, a partir de la formulación de la pregunta de esta investigación se puede decir que el efecto del ancho de camellón en la morfometría fue diferencial en las tres especies evaluadas. Es decir, el fresno mostró un mayor crecimiento en los camellones amplios en comparación con los estrechos y medianos. En laurel de la India, se observó que las variables morfométricas evaluadas fueron más altas en camellones estrechos. Si bien esto podría sugerir que el desempeño morfológico y de crecimiento del laurel de la India fue favorable en camellón estrecho no necesariamente implica que este sea el espacio más adecuado para este árbol de porte grande. Esto mismo puede aplicar a los resultados del pirul, aunque su morfometría fue indistinta de acuerdo con el ancho de camellón. Así mismo, los beneficios ambientales fueron marcadamente distintos entre las especies, ya que los valores indirectos ubican al fresno como la especie de mayor secuestro bruto de carbono y el pirul con la mayor área foliar sin importar el ancho de

camellón. En cambio, la respuesta ambiental del laurel de la India siempre se mantuvo en valores medios. De esta manera, mientras el fresno puede ser una especie nativa de gran utilidad para el secuestro de carbono, el pirul figura como una especie con amplia adaptación a las condiciones ambientales y la propiedad documentada del laurel de la India por el sombreado de su copa. Finalmente, este conjunto de respuestas puede fundamentar las estrategias, programas y planeación de mantenimiento y plantación de árboles en situación de camellón.

CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio mostraron que la morfometría fue variable en función del ancho de camellón y de la configuración del espacio urbano en calles. A partir de las medidas morfométricas evaluadas en ejemplares adultos con copa completa y aislada, logramos vincular las variaciones observadas con factores físicos urbanos como ancho de camellón, orientación y proporción AE-AC. En términos de mayor desarrollo morfométrico, el pirul mostró mayor adaptabilidad a los distintos anchos de camellón, el fresno fue favorable en camellones amplios y el laurel de la India presentó una respuesta intermedia en camellones estrechos. En cuanto a la alometría, el modelo de regresión lineal indicó una relación positiva entre la altura y el área de proyección de copa en las tres especies (más consistentemente en pirul). Por otro lado, el DAP no se asoció significativamente con las demás variables, sugiriéndose algún tipo de descompensación en el crecimiento en grosor o insuficiencia en la biomasa del tronco. Respecto a los beneficios ambientales, el fresno tuvo mayor potencial de secuestro de carbono y el pirul presentó mayor área foliar, lo que resalta la importancia de que estos hallazgos pueden ser relevantes al seleccionar especies adecuadas según las características urbanas para maximizar los beneficios ambientales.

De acuerdo con las pruebas estadísticas que se analizaron en las diferentes respuestas del presente estudio se puede decir que puede ser más clara la respuesta encontrada con tamaños de muestra más grandes, además de continuar estudiando el efecto de los factores espaciales en la morfometría de estas especies. Estos resultados también pueden evidenciar las limitaciones del entorno urbano en la morfometría de árboles de porte grande, pero quizá las dimensiones de los camellones estudiados pueden ser más favorables para arbolado de porte mediano a pequeño. De acuerdo con la incógnita formulada para esta investigación se puede decir que la variación morfométrica varió en cuanto al ancho de camellón, aunque la réplica de estos estudios en más sistemas urbanos puede servir para validar dichos resultados.

Si bien el presente estudio muestra resultados del arbolado en camellones de una ciudad semiárida de México cabe señalar la importancia de ampliar este tipo de trabajos en sistemas urbanos de otros climas y latitudes. Además de que este tipo de resultados puede contribuir con las tomas de decisión en la planeación urbana el conocimiento de la variación morfométrica del arbolado en calles puede mostrar ciertos indicadores sobre el espacio óptimo para las especies y sus posibles beneficios ambientales.

AGRADECIMIENTOS

A CONACHYT por el apoyo brindado a través de la beca 826697 de posgrado, la cual fue esencial para la realización de esta investigación.

LITERATURA CITADA

- Agriculture Fisheries and Conservation Department. (2006). *Nature Conservation Practice Note*.
- Ahmadi Venhari, A., Tenpierik, M., & Taleghani, M. (2019). The role of sky view factor and urban street greenery in human thermal comfort and heat stress in a desert climate. *Journal of Arid Environments*, 166, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.04.009>
- Ajayi, E. (2021). *Assessment of Carbon Sequestration Potential of some Selected Urban Tree Species*. <https://doi.org/10.1101/2021.08.19.457022>
- Alberti, M., Palkovacs, E. P., Roches, S. Des, De Meester, L., Brans, K. I., Govaert, L., Grimm, N. B., Harris, N. C., Hendry, A. P., Schell, C. J., Szulkin, M., Munshi-South, J., Urban, M. C., & Verrelli, B. C. (2020). The Complexity of Urban Eco-evolutionary Dynamics. En *BioScience* (Vol. 70, Número 9, pp. 772–793). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa079>
- Amer, A., Franceschi, E., Hjazin, A., Shoqeir, J. H., Moser-Reischl, A., Rahman, M. A., Tadros, M., Pauleit, S., Pretzsch, H., & Rötzer, T. (2023). Structure and Ecosystem Services of Three Common Urban Tree Species in an Arid Climate City. *Forests*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/f14040671>
- Ayuntamiento de San Luis Potosí, S. L. P. (2002). *Reglamento de parques y jardines públicos del municipio libre de San Luis Potosí, S.L.P.*
- Ballinas, M., & Barradas, V. L. (2016). Transpiration and stomatal conductance as potential mechanisms to mitigate the heat load in Mexico City. *Urban Forestry and Urban Greening*, 20, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.08.004>
- Barradas, V. L., Ruiz-Cordova, J. P., & Esperón-Rodríguez, M. (2016). Microclimatology and ecophysiology of the urban vegetation of a city with tropical climate modified by altitude in Mexico. *Botanical Sciences*, 94(4), 775–786. <https://doi.org/10.17129/botsci.627>
- Benavides-Meza, H. M., & Young-Fernández Grandizo, D. (2012). Estructura del arbolado y caracterización dasométrica de la segunda sección del Bosque de Chapultepec. *Madera Bosques*, 18(2), 51–71. <https://doi.org/10.21829/myb.2012.182352>
- Bourbia, F., & Boucheriba, F. (2010). Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). *Renewable Energy*, 35(2), 343–347. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.017>
- Cedano Billini, S. C. (2013). *Análisis de la radiación en calles de latitud 20°N* [Máster Arquitectura, Energía y Medio Ambiente]. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona.
- Chatziathanasiou, S., Kitikidou, K., & Milios, E. (2023). Allometries of *Acer negundo* for a better space management in two cities of northeastern Greece. *Folia Oecologica*, 50(1), 89–96. <https://doi.org/10.2478/foecol-2023-0008>
- Chatziathanasiou, S., Kitikidou, K., & Milios, E. (2024). Crown Width–Tree Height Models for *Magnolia grandiflora*, *Prunus cerasifera*, and *Acer negundo* Growing in Cities in Northeastern Greece. *Land*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/land13101579>
- Chatzidimitriou, A., & Axarli, K. (2017). Street Canyon Geometry Effects on Microclimate and Comfort; A Case Study in Thessaloniki. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 643–650. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.144>
- City of Melbourne. (2010). *Landscape treatment policy for nature strips and medians in streets, avenues and boulevards*.
- City of Shenandoah. (2006). *Urban forest technical manual*.
- Correa, R. N. (2018). Análisis de metodologías para la localización de microcentrales hidroeléctricas utilizando SIG. Caso aplicativo: tres cuencas del valle de Aburrán, Medellín. *Revista Científica en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad (CAS)*, 4(1), 1–31.
- Cox, S. (2011). *Urban trees: A practical management guide*. The Crowood Press.

- Czaja, M., Kołton, A., & Muras, P. (2020). The complex issue of urban trees-stress factor accumulation and ecological service possibilities. En *Forests* (Vol. 11, Número 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/F11090932>
- Dahlhausen, J., Biber, P., Rötzer, T., Uhl, E., & Pretzsch, H. (2016). Tree species and their space requirements in six urban environments worldwide. *Forests*, 7(6). <https://doi.org/10.3390/f7060111>
- Díaz-Porras, D. F., Gaston, K. J., & Evans, K. L. (2014). 110 Years of change in urban tree stocks and associated carbon storage. *Ecology and Evolution*, 4(8), 1413–1422. <https://doi.org/10.1002/ece3.1017>
- DOT (2015). Planted Raised Median Design Guidelines. Vision zero great streets. NYC Street Design Manual.
- Drolen, J., Brandt, L., Wei, Y., & Dybzinski, R. (2023). Modeling Management-Relevant Urban Forest Stand Characteristics to Optimize Carbon Storage and Sequestration. *Forests*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/f14112207>
- Du, H., Bao, Z., & Zhou, F. (2024). Carbon Sequestration of Common Garden Tree Species under the Carbon Neutrality Target in East China. *Forests*, 15(10). <https://doi.org/10.3390/f15101692>
- Eisenman, T. S., Coleman, A. F., & LaBombard, G. (2021). Street Trees for Bicyclists, Pedestrians, and Vehicle Drivers: A Systematic Multimodal Review. En *Urban Science* (Vol. 5, Número 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/urbansci5030056>
- Fang, K., Wang, X., Zhang, W., Zhang, Z., Xie, Y., Chen, L., Zhu, G., & Furuya, N. (2021). Characteristics of space network system formed by the constituent elements in urban streets: Tianzifang in Shanghai as a case study. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 20(6), 627–639. <https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1803078>
- Fatimah, H., Farooq, S., Anwar, T., Qureshi, H., Hashmi, F., Ahmad, T., Ullah, N., Munazir, M., Naseem, M. T., & Soufan, W. (2024). Assessment of growth, biomass, and carbon sequestration potential of urban tree species in greenbelts. *BMC Plant Biology*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05935-3>
- Feng, X., Wen, H., He, M., & Xiao, Y. (2023). Microclimate effects and influential mechanisms of four urban tree species underneath the canopy in hot and humid areas. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1108002>
- Findley, D. J. (2016). Part 4 - Highway Geometric Design. En D. J. Findley, B. J. Schroeder, C. M. Cunningham, & T. H. Brown (Eds.), *Highway Engineering: Planning, Design, and Operations* (pp. 167–253). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801248-2.00004-6>
- Fitzpatrick, K., Wooldridge, M. D., & Blaschke, J. D. (2004). *Urban intersection design guidece*. Forestry Suppliers, Inc. (2007). *Forestry Suppliers Tangent Height Gauge*. <https://www.forestry-suppliers.com/p/36953/12751/forestry-suppliers-tangent-height-gauge>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*.
- Gleason, S. M., & Ares, A. (2004). Photosynthesis, carbohydrate storage and survival of a native and an introduced tree species in relation to light and defoliation. *Tree Physiology*, 24, 1087–1097.
- Guo, C., Hu, Y., Qin, J., Wu, D., Xu, L., & Wang, H. (2024). Comparison of Crown Volume Increment in Street Trees among Six Cities in Western Countries and China. *Horticulturae*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/horticulturae10030300>
- Guzzetti, F., Anyabolu, K. L. N., D'Ambrosio, L., & Marchetti, G. (2019). Built environment: Modelling the urban space. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2/W11), 595–600. <https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLII-2-W11-595-2019>
- Heisler, G. (1986). Energy Savings with Trees. *Arboriculture & Urban Forestry*, 12(5), 113–125. <https://doi.org/10.48044/jauf.1986.026>

- Hernández López, P. I., & Montalvo Vargas, R. (2020). Suelo intraurbano vacante para vivienda en la ciudad de Tlaxcala, México. Una aproximación espacial. *Región y sociedad*, 32, e1279. <https://doi.org/10.22198/rys2020/32/1279>
- Hernández-López, P., Martínez-Trinidad, T., de la Rosa, P. H., Mohedano-Caballero, L., & de Guillén, M. J. G. (2023). Ecological characterization of trees at Molino de Flores Netzahualcóyotl National Park. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 29(3), 93–108. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2023.01.002>
- Hintural, W. P., Jeon, H. J., Kim, S. Y., Go, S., & Park, B. B. (2024). Quantifying Regulating Ecosystem Services of Urban Trees: A Case Study of a Green Space at Chungnam National University Using i-Tree Eco. *Forests*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/fl5081446>
- Hui, L. C., Jim, C. Y., & Zhang, H. (2020). Allometry of urban trees in subtropical Hong Kong and effects of habitat types. *Landscape Ecology*, 35(5), 1143–1160. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01006-8>
- IMPLAN de Hermosillo. (2017). *Manual de lineamientos de Diseño de Infraestructura Verde para Municipios Mexicanos*.
- IMPLAN SLP. (2021). Distritos del PDCUCP-SLP. Mapa 61. En *Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de San Luis Potosí, SLP*.
- INEGI. (2013). *Diccionario de datos topográficos escala 1: 50 000 versión 2*.
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de San Luis Potosí 2017*. www.inegi.org.mx
- INEGI. (2020a). *Inventario Nacional de Viviendas*. archivo SHP.
- INEGI. (2020b). *Marco Geoestadístico del Censo de Población y Vivienda*. archivo SHP.
- Jin, S., Zhang, E., Guo, H., Hu, C., Zhang, Y., & Yan, D. (2023). Comprehensive evaluation of carbon sequestration potential of landscape tree species and its influencing factors analysis: implications for urban green space management. *Carbon Balance and Management*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s13021-023-00238-w>
- Kim, J., Kang, Y., Kim, D., Son, S., & Kim, E. J. (2024). Carbon Storage and Sequestration Analysis by Urban Park Grid Using i-Tree Eco and Drone-Based Modeling. *Forests*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/fl5040683>
- Kjelgren, R. K., & Clark, J. R. (1992). Photosynthesis and leaf morphology of Liquidambar styraciflua L. under variable urban radiant-energy conditions. *Int J Biometeorol*, 36, 165–171.
- Langenheim, N., White, M., Tapper, N., Livesley, S. J., & Ramirez-Lovering, D. (2020). Right tree, right place, right time: A visual-functional design approach to select and place trees for optimal shade benefit to commuting pedestrians. *Sustainable Cities and Society*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101816>
- Li, H., Zhao, Y., Wang, C., Ürge-Vorsatz, D., Carmeliet, J., & Bardhan, R. (2024). Cooling efficacy of trees across cities is determined by background climate, urban morphology, and tree trait. *Communications Earth and Environment*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01908-4>
- Liang, D., & Huang, G. (2023). Influence of Urban Tree Traits on Their Ecosystem Services: A Literature Review. En *Land* (Vol. 12, Número 9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/land12091699>
- Lin, W., Guo, W., Huang, S., Wei, J., Wei, Y., Zhou, J., & Lai, C. (2024a). Effects of growth space limitation on allometry of Ficus spp. in urban habitats. *Journal of Cleaner Production*, 471, 143413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143413>
- Lin, W., Guo, W., Huang, S., Wei, J., Wei, Y., Zhou, J., & Lai, C. (2024b). Effects of growth space limitation on allometry of Ficus spp. in urban habitats. *Journal of Cleaner Production*, 471. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143413>
- Livesley, S. J., McPherson, E. G., & Calfapietra, C. (2016). The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 119–124. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0567>

- Mansour, A. I., & Aljamil, H. A. (2022). Investigating the Effect of Traffic Flow on Pollution, Noise for Urban Road Network. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 961(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/961/1/012067>
- Martínez-Millán, M., & Cevallos-Ferriz, S. R. S. (2005). Arquitectura foliar de Anacardiaceae. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 76(2). <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2005.002.308>
- Mballo, S., Herpin, S., Manteau, M., Demotes-Mainard, S., & Bournet, P. E. (2021). Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale model in outdoor environment. *Urban Climate*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100844>
- McPherson, E. G., van Doorn, N. S., & Peper, P. J. (2016). Urban tree database and allometric equations. En *Forest Service Research Data Archive*. Forest Service Research Data Archive. <https://doi.org/10.2737/RDS-2016-0005>
- McPherson, G., & Simpson, J. R. (1995). Shade trees as a demand-side resource. *Home Energy*, 12(3).
- Morakinyo, T. E., Lau, K. K. L., Ren, C., & Ng, E. (2018). Performance of Hong Kong's common trees species for outdoor temperature regulation, thermal comfort and energy saving. *Building and Environment*, 137, 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.012>
- Mullaney, J., Lucke, T., & Trueman, S. J. (2015). A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. En *Landscape and Urban Planning* (Vol. 134, pp. 157–166). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.013>
- Muscas, D., Orlandi, F., Petrucci, R., Proietti, C., Ruga, L., & Fornaciari, M. (2024). Effects of urban tree pruning on ecosystem services performance. *Trees, Forests and People*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100503>
- National Academies of Sciences, E. and M. (2023). *Long-Term Vegetation Management Strategies for Roadsides and Roadside Appurtenances*. The National Academies Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.17226/26876>.
- National Association of City Transportation Officials. (2012). *Urban street design guide*.
- Noyola-Medrano, M. C., Ramos-Leal, J. A., Domínguez-Mariani, E., Pineda-Martínez, L. F., López-Loera, H., & Carbajal, N. (2009). Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos caso Valle de San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(2), 395–410.
- ODOT (1996, febrero). Medians (Discussion Paper No. 4). Transportation Research Institute. Oregon State University.
- Oke, T. R. (1988). Street Design and Urban Canopy Layer Climate. En *Energy and Buildings* (Vol. 11).
- Osseni, A. A., Gbesso, G. H. F., & Assongba, Y. F. (2022). Phytodiversity, structure and carbon sequestered by avenue trees in the Municipality of Sèmè-Podji, Southern Benin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 16(6), 2857–2868. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v16i6.30>
- Pasiecznik, N. (2022). *Fraxinus uhdei* (tropical ash). *CABI Compendium*. <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.24559>
- Paz-Kagan, T., Zaady, E., Shachak, M., & Karnieli, A. (2016). Transformation of shrublands to forests: The role of woody species as ecosystem engineers and landscape modulators. *Forest Ecology and Management*, 361, 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.021>
- Peper, P. J., McPherson, E. G., & Mori, S. M. (2001). predictive equations for dimensions and leaf area of coastal Southern California street trees. En *Journal of Arboriculture* (Vol. 27, Número 4).
- Pereira, M. P., Rodrigues, L. C. de A., Corrêa, F. F., de Castro, E. M., Ribeiro, V. E., & Pereira, F. J. (2016). Cadmium tolerance in *Schinus molle* trees is modulated by enhanced leaf anatomy and photosynthesis. *Trees - Structure and Function*, 30(3), 807–814. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1322-0>

- Pires, M. F., Pereira, M. P., de Castro, E. M., Barbosa, S., & Pereira, F. J. (2015). Micromorfometría foliar de *Schinus molle* L. (Anacardiaceae) em diferentes alturas na copa. *Cerne*, 21(1), 17–25. <https://doi.org/10.1590/01047760201521011530>
- Pokorny, J., O'Brien, J., Hauer, R., Johnson, G., Albers, J., Bedker, P., & Mielke, M. (2003). *Urban Tree Risk Management: A Community Guide to Program Design and Implementation*. USDA Forest Service Northeastern Area State and Private Forestry. 1992 Folwell Ave. St. Paul, MN 55108.
- Pretzsch, H., Biber, P., Uhl, E., Dahlhausen, J., Rötzer, T., Caldentey, J., Koike, T., van Con, T., Chavanne, A., Seifert, T., Toit, B. du, Farnden, C., & Pauleit, S. (2015). Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban Forestry and Urban Greening*, 14(3), 466–479. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.006>
- Rakowska, A., Wong, K. C., Townsend, T., Chan, K. L., Westerdahl, D., Ng, S., Močnik, G., Drinovec, L., & Ning, Z. (2014). Impact of traffic volume and composition on the air quality and pedestrian exposure in urban street canyon. *Atmospheric Environment*, 98, 260–270. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.073>
- Ramírez-Albores, J., & Badano, E. (2013). *Perspectiva histórica, sociocultural y ecológica de una invasión biológica: el caso del Pirul (Schinus molle L., Anacardiaceae) en México (Boletín de la RLEEI - Actualmente Revista Bioinvasiones)*. 4, 4–15.
- Ramírez-Albores, J. E., Avendaño-González, M., & Badano, E. I. (2015, febrero). El Pirul, el árbol que vino del sur. *CONABIO. Biodiversitas*, 117, 6–11.
- Ramos-Palacios C.R. 2019. Guía del arbolado y otras formas vegetales en situación de banqueta Ciudad de San Luis Potosí. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. UASLP-SEGAM. San Luis Potosí, S.LP. 347 p. ISBN 978-607-535-120-9
- Rantzoudi, E. C., & Georgi, J. N. (2017). Correlation between the geometrical characteristics of streets and morphological features of trees for the formation of tree lines in the urban design of the city of Orestiada, Greece. *Urban Ecosystems*, 20(5), 1081–1093. <https://doi.org/10.1007/s11252-017-0655-4>
- Rasoolzadeh, R., Mobarghaee Dinan, N., Esmailzadeh, H., Rashidi, Y., Marcu, M. V., & Sadeghi, S. M. M. (2024). Carbon Sequestration and Storage of Urban Trees in a Polluted Semiarid City. *Forests*, 15(9), 1488. <https://doi.org/10.3390/fl5091488>
- Ren, X., Zhang, G., Chen, Z., & Zhu, J. (2023). The Influence of Wind-Induced Response in Urban Trees on the Surrounding Flow Field. *Atmosphere*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/atmos14061010>
- Roberts, J., Jackson, N. A., & Smith, D. M. (2006). *Tree Roots in the Built Environment*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:128659297>
- Rodriguez-Valencia, A., & Ortiz-Ramirez, H. A. (2021). Understanding green street design: Evidence from three cases in the U.S. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su13041916>
- Sanders, J. R., & Grabosky, J. C. (2014). 20 years later: Does reduced soil area change overall tree growth? *Urban Forestry and Urban Greening*, 13(2), 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.12.006>
- Sanusi, R., Johnstone, D., May, P., & Livesley, S. J. (2017). Microclimate benefits that different street tree species provide to sidewalk pedestrians relate to differences in Plant Area Index. *Landscape and Urban Planning*, 157, 502–511. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.010>
- SEDATU. (2019). *Manual de calles: diseño vial para ciudades mexicanas*.
- SEDATU. (2023). *NOM-004-SEDATU-2023, Estructura y diseño para vías urbanas. Especificaciones y aplicación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.
- Sharma, G., Morgenroth, J., Richards, D. R., & Ye, N. (2025). Advancing urban forest and ecosystem service assessment through the integration of remote sensing and i-Tree Eco: A systematic review. En *Urban Forestry and Urban Greening* (Vol. 104). Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128659>

- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2003). Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. *Energy and Buildings*, 35, 61–68.
- Singh, A. K., Singh, J. S., Singh, H., & Mishra, R. K. (2023). Quantifying carbon Stock and tree species diversity of green infrastructure of Varanasi, India. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PLANT AND ENVIRONMENT*, 9(01), 15–23. <https://doi.org/10.18811/ijpen.v9i01.03>
- Singh, H., Yadav, M., Kumar, N., Kumar, A., & Kumar, M. (2020). Assessing adaptation and mitigation potential of roadside trees under the influence of vehicular emissions: A case study of *Grevillea robusta* and *Mangifera indica* planted in an urban city of India. *PLoS ONE*, 15(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227380>
- Speak, A. F., & Salbitano, F. (2023). The impact of pruning and mortality on urban tree canopy volume. *Urban Forestry & Urban Greening*, 79, 127810. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127810>
- Srivanit, M., & Jareemit, D. (2020). Modeling the influences of layouts of residential townhouses and tree-planting patterns on outdoor thermal comfort in Bangkok suburb. *Journal of Building Engineering*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101262>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Stoffberg, G. H., van Rooyen, M. W., van der Linde, M. J., & Groeneveld, H. T. (2008). Predicting the growth in tree height and crown size of three street tree species in the City of Tshwane, South Africa. *Urban Forestry and Urban Greening*, 7(4), 259–264. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2008.05.002>
- Suchocka, M., Swoczyna, T., Kosno-Jonczy, J., & Kalaji, H. M. (2021). Impact of heavy pruning on development and photosynthesis of *Tilia cordata* Mill. trees. *PLoS ONE*, 16(8 August). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256465>
- Swiecki, T. J., & Bernhardt, E. A. (2001). *Guidelines for Developing and Evaluating Tree Ordinances Site Map*. <http://www.isa-arbor.com/tree-ord/>
- Takagi, M., & Gyokusen, K. (2004). Light and atmospheric pollution affect photosynthesis of street trees in urban environments. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2(3), 167–171. <http://www.elsevier-deutschland.de/ufug>
- Tan, X., Hirabayashi, S., & Shibata, S. (2021). Estimation of ecosystem services provided by street trees in Kyoto, Japan. *Forests*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/fl2030311>
- Tejeda-Martínez, A., & Gómez-Azpeitia, G. (2015). *Prontuario solar de México*.
- Thomas, O., Stephen, O. E., Aondofa, A. B., & Felicia, I. E. (2022). Carbon credit assessment and importance value indices of trees in urban parks: a case study of Benue State Secretariat, Makurdi. En *FUW Trends in Science & Technology Journal*, www.fstjournal.com e-ISSN (Vol. 6, Número 3). <https://www.researchgate.net/publication/362580434>
- Tochaiwat, K., Phichetkunbodee, N., Suppakittpaisarn, P., Rinchumphu, D., Tepweerakun, S., Kridakorn Na Ayutthaya, T., & Sittisom, P. (2023). Eco-Efficiency of Green Infrastructure on Thermal Comfort of Outdoor Space Design. *Sustainability (Switzerland)*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15032566>
- USDA Forest Service. (2017). *i-Tree ECO Manual de toma de datos*. www.itreetools.org
- USDA Forest Service. (2021). *i-Tree Eco field guide (v6)*.
- Vasagadekar, P. R., Gargate, A. V., Patil, Y. Y., & Raut, P. D. (2023). Carbon sequestration potential of trees from urban green spaces of Kolhapur city, Maharashtra, India. *Environmental and Socio-Economic Studies*, 11(3), 22–32. <https://doi.org/10.2478/environ-2023-0014>
- Vaz Monteiro, M., Doick, K. J., & Handley, P. (2016). Allometric relationships for urban trees in Great Britain. *Urban Forestry and Urban Greening*, 19, 223–236. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.07.009>

Recibido:
18/febrero/2025

Aceptado:
8/junio/2025

- Wan Ismail, W. N., Ja'afar, N. H., & Harun, N. Z. (2020). Physical qualities and elements of streets in the context of royal town in Malaysia. *Rupkatha Journal on Interdisciplinary Studies in Humanities*, 12(1), 1–13. <https://doi.org/10.21659/rupkatha.v12n1.21>
- Yang, J., Zhang, M., Zhang, J., Lu, H., & Hauer, R. J. (2023). Allometric Growth of Common Urban Tree Species in Qingdao City of Eastern China. *Forests*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/f14030472>
- Zhang, X., Huang, H., Tu, K., Li, R., Zhang, X., Wang, P., Li, Y., Yang, Q., Acerman, A. C., Guo, N., & Liu, Y. (2024). Effects of plant community structural characteristics on carbon sequestration in urban green spaces. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57789-2>
- Zielonko-Jung, K., & Janiak, J. (2022). Trees as a solar control measure for southern-oriented street frontages. Analysis of a selected street model for a humid continental climate. *Urban Ecosystems*, 25, 111–119. <https://doi.org/10.1007/s11252-021-01128-0/Published>