BOSQUE 46(1): 3-14, 2025 DOI: 10.4067/S0717-92002025000100003

REVISIONES

El rol de los bosques urbanos en el secuestro de CO_2 como servicio ecosistémico: Análisis del estado del conocimiento.

The role of urban forests in CO_2 sequester as an ecosystem service: Current knowledge analysis.

Rocío A Ahumada [a]*, M Alicia Cantón [a], Claudia F Martinez [a]

*Autor de correspondencia: [a] CONICET, Centro Científico Tecnológico (CCT Mendoza), Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), Mendoza, Argentina, tel.: +54 2614700592, rahumada@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN

Los bosques urbanos han contribuido significativamente en el secuestro de CO_2 asociado al proceso de fotosíntesis, lo que ha permitido mitigar los efectos del cambio climático. El objetivo de esta revisión bibliográfica ha sido recopilar y sistematizar el estado de conocimiento asociado al secuestro de CO_2 en ambientes urbanos mediante la búsqueda y análisis de artículos científicos en el periodo 2013-2023. La sistematización de la información se estructuró en torno a tres ejes: información general, metodologías y resultados obtenidos. Se observó que este tema presenta una tendencia creciente, en países de Asia y América del Norte, en ciudades con diferentes características climáticas, siendo incipiente su desarrollo para ciudades de clima árido y de América del Sur. Los datos encontrados indicaron valores de entre 0,42 a 1.901 toneladas por hectárea de CO_2 secuestrado por bosques urbanos insertos en distintos climas. Dichos valores resultaron de la aplicación de modelos alométricos específicos y de programas de cómputo como Center for Urban Forestry Research's Tree Carbon Calculator (CTCC) y i-Tree. Las diferencias que se encontraron se relacionan a la condición forestal, siendo los ejemplares adultos, perennifolios y de rápido crecimiento, los más eficientes en el secuestro anual de CO_2 en relación con ejemplares jóvenes, caducifolios y de lento crecimiento.

Palabras clave: dasonomía urbana, secuestro de carbono, prestaciones ambientales, revisión bibliográfica

SUMMARY

Urban forests have contributed significantly to CO_2 sequestration associated with photosynthesis, which mitigates the effects of climate change. The objective of this literature review was to collect and systematize the state of knowledge associated with CO_2 sequestration in urban environments through a search and analysis of scientific articles in the period 2013-2023. Information systematization is structured around three axes: general information, methodologies, and obtained results. It was observed that the thematic approach presents a growing trend in Asian and North American countries in cities with different climatic characteristics, being incipient of its development for cities with arid climates in South America. The data indicate values between 0.42 and 1,901 tons per hectare of CO_2 sequestered by urban forests in different climates. These values resulted from the application of specific allometric models and software, such as the Center for Urban Forestry Research's Tree Carbon Calculator (CTCC) and i-Tree. The differences found were related to the forest condition, with the adult, perennial, and fast-growing species being the most efficient in terms of CO_2 annual sequestration in relation to young, deciduous, and slow-growing species.

Keywords: urban forestry, carbon sequestration, environmental benefits, literature review

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la concentración urbana de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera se encuentra en significativo aumento en relación con la era preindustrial. En 2019, ya se observa que las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) alcanzan 410 partes por millón (ppm) -que representa un 47,3 % de aumento-, mientras que el metano (CH_4) ha registrado 1.866 partes por mil millones (ppb) -esto representa un incremento del 157,8 %- y el óxido nitroso (N_2O) ha alcanzado 332 ppb, 32 % más que en 1770 (IPCC 2023). Cabe indicar que la actividad antrópica en las ciudades y su crecimiento incrementa la contaminación ambiental.

Frente al cambio climático, las ciudades, alineadas a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU 2015), buscan aplicar medidas de mitigación para disminuir sus efectos. Una de estas medidas es la incorporación de in-

fraestructura verde urbana (IVU), entendida como una red interconectada de espacios verdes que conservan las funciones y valores de los ecosistemas naturales y provee beneficios asociados a la población (Vargas-Hernández y Zdunek-Wielgołaska 2021). Dentro de la IVU, los bosques urbanos representan estrategias relevantes para controlar los factores ambientales condicionantes para las ciudades. Los bosques urbanos se refieren al recurso forestal y los sistemas biológicos asociados presentes en las ciudades, por lo que comprenden todos los conjuntos de árboles, agrupados en plazas y parques, tanto en alineación de calles como plantados en forma individual; en áreas urbanas y periurbanas (FAO 2016). El arbolado urbano aporta numerosos servicios ecosistémicos en entornos edificados, desde ecosistemas silvestres transformados hasta los construidos con la participación directa del trabajo humano (Hasse 2019). Los servicios ecosistémicos se estructuran en cuatro tipos: de soporte -fotosíntesis, ciclo de nutrientes, ciclo del agua-; de regulación -del clima local y la calidad de aire, infiltración y drenaje de agua, polinización, reducción sonora, balance de O_2 y CO_2, secuestro de carbono-; de provisión -alimentos, medicamentos, recursos genéticos, sombra, habitabilidad- y culturales -recreación, ecoturismo, diversidad cultural, patrimonio natural y biodiversidad, valor educativo, integración social, salud psico-física, entre otras- (Vásquez 2016).

En este marco, el secuestro de carbono por el arbolado urbano constituye de manera directa e indirecta, una medida de mitigación frente al cambio climático. En forma directa, puesto que el carbono es un componente de todas las formas de vida biológica, y los árboles lo utilizan para realizar la fotosíntesis y desarrollar biomasa, absorbiendo CO_2 atmosférico. Asimismo, la contribución indirecta del bosque urbano a la disminución de CO_2 atmosférico, se debe al efecto de enfriamiento que ofrece la sombra que genera, reduciendo el uso de energía y las emisiones de carbono asociadas a la calefacción y refrigeración de edificios y hogares (Bherwani *et al.* 2022).

Para la comprensión del servicio ecosistémico de secuestro de CO_2, toma importancia la ecología forestal (Gomes Pires de Paula *et al.* 2020). Permite analizar de qué forma dicho secuestro otorga al bosque urbano un papel fundamental en la dinámica de la ciudad y la calidad de vida del habitante urbano. Los árboles en alineación de calles enfrentan entornos más críticos y tienen menores oportunidades de realizar fotosíntesis en forma óptima dadas las condiciones del ambiente construido, la contaminación ambiental creciente, el aumento progresivo de temperaturas urbanas y de sequías frecuentes previstas a futuro; por tanto, las contribuciones del arbolado urbano al ambiente pueden verse comprometidas (Wang *et al.* 2019). El estudio del secuestro de CO_2 ofrece herramientas de manejo y planificación, así como cuantificarlo como servicio ambiental, en miras a potenciar los beneficios de los bosques urbanos, valorarlos de forma tangible y promover su incorporación y mantenimiento en las ciudades (López-López *et al.* 2018, Snehlata *et al.* 2021, Tan *et al.* 2021, Koricho *et al.* 2022, Alpaidze y Salukvadze 2023).

El secuestro de CO_2 ha sido estudiado a nivel mundial por numerosos investigadores, enfocados en climas templados y tropicales. Se ha desarrollado en países como EEUU, Italia, China, Colombia, Ecuador, México y Argentina (McPherson *et al.* 2013, Nowak *et al.* 2014, Russo *et al.* 2014, Acuña-Simbaqueva *et al.* 2021, Wang *et al.* 2021, Castillo Ruperti *et al.* 2022, Duval *et al.* 2023, Zhao *et al.* 2023). No obstante, se encuentran escasas referencias de estudios en ciudades de clima árido expuestas a condiciones ambientales más desafiantes (Kim y Coseo 2018, Isaifan y Baldauf 2020).

El objetivo del presente trabajo es explorar el estado del arte respecto del secuestro de CO_2 por el arbolado urbano a nivel nacional e internacional. Se busca comprender el tema en referencia al impacto en la sostenibilidad de las ciudades y a las herramientas disponibles para su cuantificación. Se focaliza en ciudades de clima árido, tal como es el caso de Mendoza-Argentina, pero se discute la relevancia del secuestro de CO_2 para los diferentes climas. En este sentido a escala local, en el Área Metropolitana de Mendoza (AMM) Argentina, interesa la cuantificación del secuestro de CO_2 por parte del arbolado urbano dada su abundante plantación (615.835 árboles en 325 km^2, Unicipio 2023). A partir del inventario de gases de efecto invernadero de la ciudad de Mendoza, se determina que en el año 2020 las emisiones alcanzaron 628.444 ton de CO_2 equivalente (Plan Local de Acción Climática de la Ciudad de Mendoza 2023), valor que se busca reducir en el marco del programa de mitigación de los efectos del cambio climático. El AMM se emplaza en una zona árida con restricción del recurso hídrico, con un clima continental semiárido -BWk según la clasificación climática de Köppen-Geiger-. Con precipitaciones promedio de 200 mm anuales, concentradas en verano, tiene un índice de aridez de 0,174 (bioclima árido inferior), grandes amplitudes térmicas diarias y estacionales (temperatura media en julio: 8 °C, temperatura media en enero: 26,5 °C), alta radiación solar global -1.840 MJ m^{-2}- y elevado porcentaje de días de cielo claro (2.762 hs. sol/). Desde el punto de vista urbanístico, la ciudad de Mendoza tiene una importante cantidad de espacios forestados, dando lugar a un modelo urbano calificado como "ciudad-oasis" (Bórmida 1984, citado por Martinez *et al.* 2014). El bosque urbano presenta árboles plantados a lo largo de calles, avenidas, plazas y parques, acompañados de un sistema de riego artificial. Esta IVU garantiza la validez del modelo de "ciudad-oasis" en relación con la sustentabilidad ambiental y la calidad de vida de sus usuarios; constituyendo una estrategia relevante para mitigar el CO_2 atmosférico y su efecto invernadero.

METODOLOGÍA

Esta revisión se estructuró en rastreo bibliográfico y sistematización y análisis de la información. La explora-

ción de artículos científicos fue realizada mediante el uso de palabras claves bilingües -inglés, español-, en bases de datos digitales ScienceDirect, ProQuest, EBSCOhost, CSA Illumina, informaworld, SpringerLink, Web of Science, y Wiley Interscience. El período de búsqueda fue 2013-2023 dado que no se encontraron revisiones anteriores al año 2013 que específicamente evaluaran el secuestro de CO_2 por bosques urbanos. Se empleó la búsqueda avanzada de estas bases de datos con las siguientes palabras clave: carbon sequestration, urban forest, ecosystem services; y en español: secuestro de carbono, bosque urbano, servicios ecosistémicos; relacionadas con el operador booleano "AND". Los artículos recopilados fueron seleccionados en función de su calidad, determinada a partir del análisis sistémico de indicadores relacionados a la pertinencia temática, presencia de términos en título, resumen y palabras clave, idioma, y considerando que los documentos tomaran como objetivo principal el secuestro de CO_2. Otro criterio para excluir artículos fue no considerar las revisiones (figura 1).

De esta forma quedó definido un universo de análisis de 41 artículos que evalúan el potencial de secuestro de CO_2 de los bosques urbanos (cuadro 1).

Para sistematizar la información, se elaboró una base de datos estructurada en tres ejes: A) Información general (distribución geográfica, climática y temporal de la producción científica); B) Metodología de análisis de cuantificación de CO_2 secuestrado, clasificada según dos métodos teóricos: modelos y/o programas computacionales, identificando fortalezas y debilidades. Se compararon los datos de ingresos referidos a las variables dasométricas para determinar biomasa y por tanto CO_2 secuestrado, variables fisiológicas medidas, equipo utilizado, y período estacional de mediciones. C) Resultados obtenidos en términos de rangos de secuestro de CO_2 y su discriminación para los distintos climas.

Para el tratamiento estadístico de los datos se utilizó el programa Infostat (Di Rienzo *et al.* 2011). Como estadígrafo, se seleccionó la mediana respecto del carbono secuestrado en ton/ha. Se utilizó esta medida dado que los

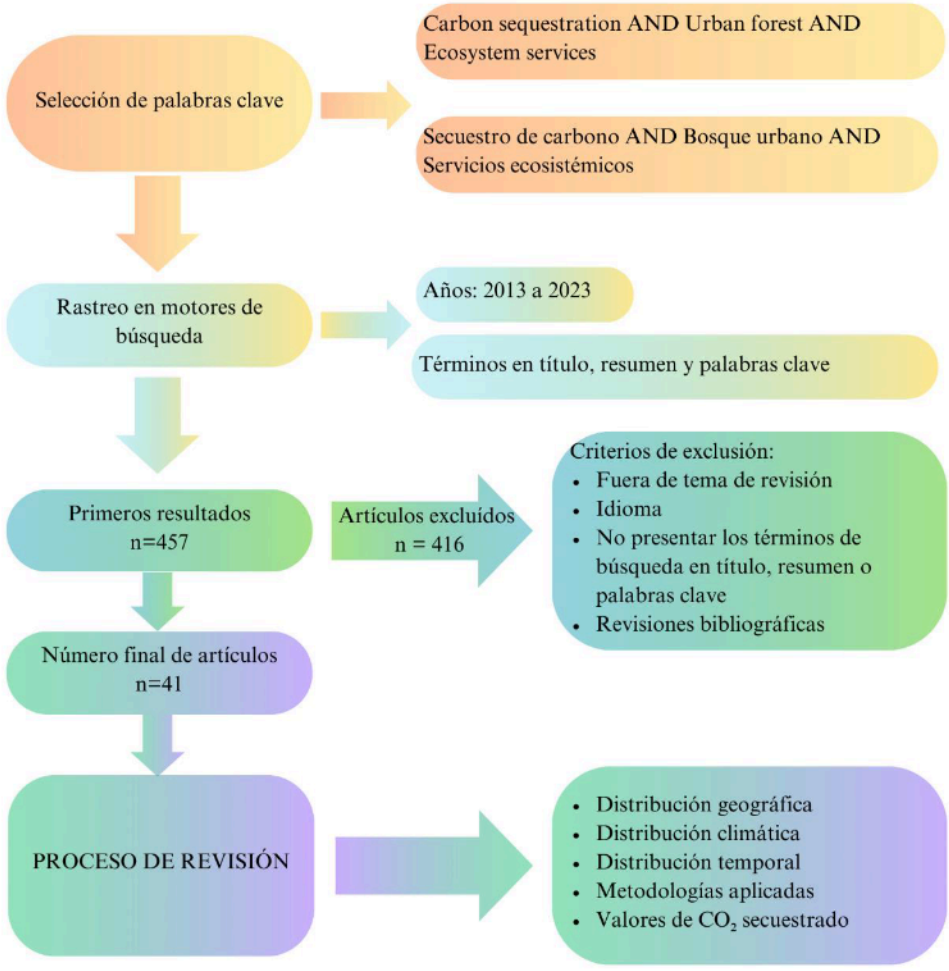


Figura 1. Esquema seguido para la obtención de los artículos para la revisión. Los colores representan las distintas fases del proceso de recopilación y revisión de datos.

Scheme followed to obtain the papers for the review. Colors represent the different phases of the data collection and review process.

Cuadro 1. Artículos revisados según clima, ubicación geográfica y año de publicación.

Reviewed papers according to climate, geographical location and publication year

Nº	Clima (Köppen-Geiger)	País. Continente.	Artículo	Autores	Año
1	Af	Colombia - América del Sur	Mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero de hogares por arbolado urbano en Ibagué-Colombia	Acuña-Simbaqueva *et al.*	2021
2	Am	Indonesia – Asia	Carbon sequestration by above-ground biomass in urban green spaces in Singaraja city	Oviantari *et al.*	2018
3	Am	India – Asia	Carbon Storage in Trees of Urban and Peri-urban Forests of Agartala, Tripura	Majumdar y Selvan	2018
4	Am Aw	Nigeria – África	Tree species diversity, volume yield, biomass and carbon sequestration in urban forests in two Nigerian cities	Agbelade y Onyekwelu	2020
5	Aw	Cuba - América Central	Comportamiento del carbono retenido en el arbolado urbano en el sur de la ciudad de Guantánamo	Rodríguez Matos y Ajete Hernández	2018
6	Aw	Tailandia – Asia	Carbon Sequestration Estimation of Urban Trees in Parks and Streets of Bangkok Metropolitan, Thailand	Fujimoto *et al.*	2016
7	Bwh	Qatar - Asia	Estimating Economic and Environmental Benefits of Urban Trees in Desert Regions	Isaifan y Baldauf	2020
8	Bsh	India – Asia	Carbon flow in Delhi urban forest ecosystems	Tripathi y Joshi	2015
9	Bwh	EEUU - América del Norte	Urban Park Systems to Support Sustainability: The Role of Urban Park Systems in Hot Arid Urban Climates	Kim y Coseo	2018
10	Bsh	India – Asia	Urban tree carbon density and CO_2 equivalent of National Zoological Park, Delhi	Snehlata *et al.*	2021
11	Bsh	Etiopía – África	Study on the ecosystem services of urban forests: implications for climate change mitigation in the case of Adama City of Oromiya Regional Sate, Ethiopia	Koricho *et al.*	2022
12	Cfa	Ecuador - América del Sur	Captura de carbono del arbolado de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador	Castillo Ruperti *et al.*	2022
13	Cfa	Corea del Sur – Asia	Volumetric equation development and carbon storage estimation of urban forest in Daejeon, Korea	Park *et al.*	2018
14	Cfa	India – Asia	Carbon Storage and Carbon Dioxide Sequestration by Urban Tree Cover: Case Study From Varanasi, India	Singh *et al.*	2022
15	Cfa	EEUU - América del Norte	Modeling air pollutant removal, carbon storage, and CO_2 sequestration potential of urban forests in Scotlandville, Louisiana, USA	Ning *et al.*	2016
16	Cfa	EEUU - América del Norte	Estimating carbon storage in urban forests of New York City	Pregitzer *et al.*	2022
17	Cfa	China - Asia	What causal drivers influence carbon storage in Shanghai, China's urban and peri-urban forests?	Yao *et al.*	2017
18	Cfa	Japón – Asia	Estimation of Ecosystem Services Provided by Street Trees in Kyoto, Japan	Tan *et al.*	2021
19	Cfa	Argentina - América del Sur	Secuestro de carbono en árboles urbanos de Bahía Blanca, Argentina	Duval *et al.*	2023
20	Cfb	Italia – Europa	Assessing urban tree carbon storage and sequestration in Bolzano, Italy	Russo *et al.*	2014
21	Cfb	Nueva Zelanda – Oceanía	Photosynthetic CO_2 uptake and carbon sequestration potential of deciduous and evergreen tree species in an urban environment	Weissert *et al.*	2017

Continúa

Continuación Cuadro 1

22	Csa	Italia - Europa	Carbon sequestration of four urban parks in Rome	Gratani *et al.*	2016
23	Csa	EEUU - América del Norte	A new approach to quantify and map carbon stored, sequestered and emissions avoided by urban forests	McPherson *et al.*	2013
24	Csa	México - América del Norte	Estimación del carbono almacenado del arbolado urbano de Guadalajara, Jalisco, México, mediante modelos Biométricos	Rodríguez Matos *et al.*	2022
25	Cwa	Brasil - América del Sur	An estimation of ecosystem services provided by urban and peri-urban forests: A case study in Juiz de Fora, Brazil	Costemalle *et al.*	2022
26	Cwb	Bolivia - América del Sur	Estimación del almacenamiento y retención de Dióxido de carbono en el arbolado urbano público de la zona de Achumani de la ciudad de La Paz a través de una aplicación móvil	Pacheco Gutiérrez	2020
27	Cwb	México - América del Norte	Diversidad, estructura y servicios ecosistémicos del arbolado en cuatro parques de Texcoco mediante i-Tree Eco	Martínez-Trinidad *et al.*	2021
28	Cwb	México - América del Norte	Servicios Ecosistémicos del Arbolado Urbano en la Laguna de San Baltazar, Puebla, mediante el uso del software i-Tree	Hernández-Castán *et al.*	2023
29	Dfa	EEUU - América del Norte	Assessing the performance of urban forest carbon sequestration models using direct measurements of tree growth	Boukili *et al.*	2017
30	Dfa	EEUU - América del Norte	Current and future biomass carbon uptake in Boston's urban forest	Trlica *et al.*	2020
31	Dfb	Finlandia - Europa	Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: A case study from Helsinki	Ariluoma *et al.*	2020
32	Dfb	Canadá - América del Norte	A national assessment of urban forest carbon storage and sequestration in Canada	Steenberg *et al.*	2023
33	Dfb	Georgia - Europa	Green in the City: Estimating the Ecosystem Services Provided by Urban and Peri-Urban Forests of Tbilisi Municipality, Georgia	Alpaidze *et al.*	2023
34	Dwa	China - Asia	Promoting sustainable carbon sequestration of plants in urban greenspace by planting design: A case study in parks of Beijing	Wang *et al.*	2021
35	Dwa	China - Asia	Carbon Storage and Sequestration of Urban Street Trees in Beijing, China	Tang *et al.*	2016
36	Dwa	China - Asia	Assessment of Urban Forest Ecological Benefit Based on the i-Tree Eco Model—A Case Study of Changchun Central City	Zhao *et al.*	2023
37	Dwa	China - Asia	Land pavement depresses photosynthesis in urban trees especially under drought stress	Wang *et al.*	2019
38	Aw, Bsh, Dfb	India - Asia	Role and value of urban forests in carbon sequestration: review and assessment in Indian context	Bherwani *et al.*	2022
39	Af, Cwb	Singapur –Asia México- América del Norte	Does urban vegetation enhance carbon sequestration?	Velasco *et al.*	2016
40	Aw	Tailandia - Asia	Investigating carbon dioxide absorption by urban trees in a new park of Bangkok, Thailand	Tor-Ngern y Leksungnoen	2020
41	Cfa	México – América del Norte	Biomass and carbon storage in trees of the first section of Chapultepec Park, Mexico City	López-López *et al.*	2018

Referencias: Af = Tropical Ecuatorial; Am = Tropical Monzónico; Aw = Tropical Sabana; Bsh = Seco Estepario Cálida; Bwh = Seco Desértico Cálido; Cfa = Templado Subtropical Húmedo; Cfb = Templado Marítimo de Costa Occidental; Csa = Templado Mediterráneo; Csb = Templado Mediterráneo de Veranos Frescos; Cwa = Templado Subtropical con Inviernos Secos; Cwb = Templado con Inviernos Secos; Dfa = Continental de Veranos Cálidos; Dfb = Continental de Veranos Frescos; Dwa = Continental de Veranos Cálidos

datos no presentan una distribución normal y su cantidad acotada hace que sea la indicada para obtener un valor medio de referencia. También se realizó un análisis de correlación mediante el coeficiente de Pearson para comparar el CO_2 secuestrado con relación al régimen de precipitación anual y la temperatura media del aire, para todas las locaciones revisadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados de la sistematización de los artículos seleccionados en los tres ejes de análisis antes descritos, con su correspondiente discusión.

Información General

- Distribución geográfica

En los artículos seleccionados se estudiaron 47 ciudades concentradas en países de Asia y América del Norte, con el 42 % y el 27 % respectivamente. América del Sur representó el 12 % y Europa reunió el 10 % de las publicaciones analizadas. Los continentes con menor cantidad de artículos revisados son África (5 %), Oceanía (2 %) y América Central (2%). Esto coincidió con los resultados aportados por Weissert y colaboradores (2014). Mientras que Kinnunen y colaboradores (2022) refieren que los estudios se concentran en América del Norte y Europa. Favorecen esta situación, el incremento de los efectos del cambio climático y la necesidad de buscar herramientas para afrontarlo y mitigarlo, actuando en forma local para responder de manera global, en concordancia con los ODS. De manera particular con los Objetivos 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y 13 (Acción por el clima), así como con los pronósticos del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (ONU 2015, IPCC 2023).

- Distribución climática según la clasificación de Köppen-Geiger

Se observó que la distribución de los artículos analizados según el clima agrupado de la ciudad de estudio, mostró una amplia variedad de tipos climáticos, donde la mayor cantidad de publicaciones se concentró en climas tipo C-templado (41 %), seguido por climas tipo A- tropicales (24 %). En el caso de climas tipo D-continentales, fueron representados por el 20 % de los artículos. Finalmente, los climas tipo B-secos fueron referenciados en el 15 % de los trabajos analizados.

Acorde a la metodología seguida se nota un bajo grado de representatividad del clima seco desértico y cálido en el desarrollo de estudios de secuestro de CO_2 por el bosque urbano (Kim y Coseo 2018, Isaifan y Baldauf 2020).

Los valores de secuestro de CO_2 según los distintos climas fueron más altos para ciudades templadas en relación con ciudades de clima continental y seco (Rodríguez-Matos *et al.* 2018, Bherwani *et al.* 2022). Los valores más elevados coincidieron con climas donde se desarrollan especies perennifolias (Gratani *et al*. 2016, Acuña-Simbaqueva *et al.* 2021), mientras que los más bajos respondieron a climas áridos, con estación seca o de receso vegetativo, donde el desarrollo de los árboles se ve limitado al régimen pluviométrico o al aporte adicional de agua por riego (Koricho *et al.* 2022). Aquí también influyó el modelo urbano adoptado, si es compacto con vegetación en la periferia de la ciudad o bien si corresponde a un modelo abierto de ciudad-oasis con una intensa trama de árboles alineados en paralelo a las calles (Martinez *et al*. 2014).

- Distribución temporal

En el período analizado se observó una tendencia positiva y ascendente respecto al estudio del secuestro de CO_2 por los bosques urbanos. Inició con un número que representa aproximadamente el 5 % anual (1 artículo), y en la actualidad incrementó al 15 %, es decir 5 artículos publicados anualmente. Esto dio una idea de la relevancia creciente de la temática en los últimos años (figura 2).

Metodologías aplicadas

El total de artículos analizados describieron el uso de modelos teóricos para la cuantificación del secuestro de CO_2. No obstante, se diferenciaron dos aplicaciones: modelos alométricos desarrollados previamente en la zona de estudio, y aplicaciones de cómputo como i-Tree Canopy, i-Tree Eco, Carbon Tree Calculator (Center for Urban Forest Research - CUFR) y Kuka-Suite App. Un modelo alométrico es una ecuación basada en análisis de regresión lineal o no lineal que describe la relación entre variables dasométricas, como el diámetro de tronco medido a 1,30 m a partir de la base (DAP) y la altura total del forestal; la biomasa y finalmente el carbono almacenado de dicho forestal. Estos modelos han sido desarrollados a lo largo del tiempo para bosques naturales (Segura y Kanninen 2005, Lozano Sivisaca *et al.* 2018), no así para bosques urbanos, cuyo abordaje es más reciente (Dobbs *et al.* 2011, Weissert *et al.* 2017). Los modelos variaron según el objetivo de los artículos y los métodos aplicados, *i.e.* Tang *et al* (2016) emplean la Ecuación [1] para *Fraxinus* spp.:

$$B = 2{,}1893 + 3{,}2949 * 10^{-2} * D * H \qquad [1]$$

Donde B es biomasa, D es DAP y H es altura del árbol. Luego, la biomasa se afecta por 0,5 para obtener el valor de C.

Así, los modelos alométricos permitieron determinar el secuestro de CO_2, de manera precisa para una ciudad o región, considerando sus características climáticas y la especie o género a evaluar. Por tanto, si los modelos ajustaron a los datos, su aplicación permitiría obtener información

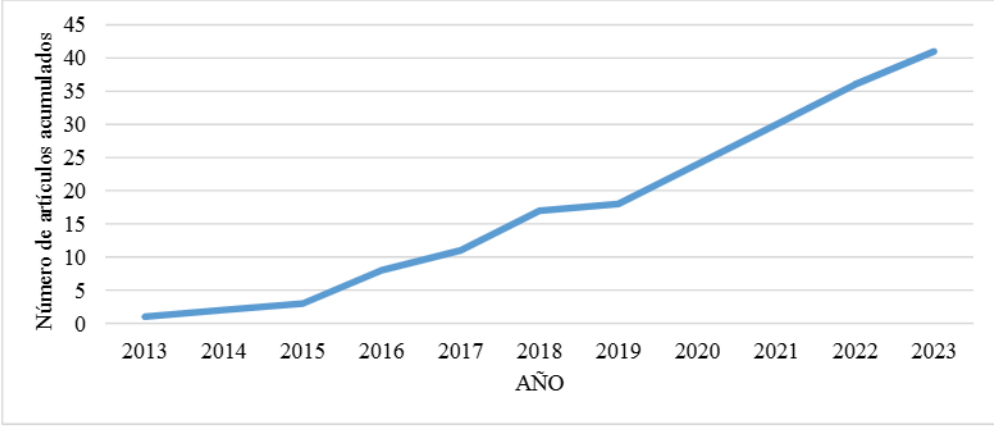


Figura 2. Distribución temporal de los artículos analizados. Curva de frecuencias acumuladas.

Temporal distribution of analyzed papers. Cumulative frequency curve.

válida sobre la variable a estudiar. No obstante, el desarrollo de estos modelos implicó la recolección y análisis de numerosos datos para que tenga validez estadística (Park *et al*. 2018).

Por su parte, los programas más utilizados fueron i-Tree y CUFR. El primero es un conjunto de programas de acceso libre desarrollado por el Servicio Forestal de EEUU (USDA 2006) pero adaptado sólo a algunos países. Proporcionó herramientas para analizar el arbolado urbano y rural, permitiendo mejorar su gestión y cuantificar los servicios ecosistémicos (Martinez Trinidad *et al.* 2021). Dentro del grupo de análisis de árboles individuales, se encontró el programa i-Tree Eco (Ariluoma *et al*. 2020, Koricho *et al.* 2022), que a través de la obtención de datos en campo y su análisis, permitió caracterizar individuos, bosques o parcelas aisladas de árboles. Los resultados incluyeron: análisis funcionales de los bosques (eliminación de contaminantes atmosféricos, secuestro de CO_2, efectos energéticos sobre edificios) y análisis estructurales (condición y distribución de especies, índice de área foliar y biomasa, índices de biodiversidad) (Tan *et al.* 2021). Otro programa utilizado fue i-Tree Canopy (Alpaidze y Salukvadze 2023, Duval *et al.* 2023). Permitió estimar a partir de una imagen satelital, las diferentes coberturas del suelo de un sitio, incluida la arbórea. Esta caracterización estimó diversos servicios ecosistémicos como secuestro de CO_2 y efectos sobre escorrentías, entre otros. Estos programas han sido desarrollados específicamente para ciudades de EEUU, Canadá, Australia, México y Colombia; utilizando bases de datos con variables climáticas, valores de contaminación y las especies más frecuentes en dichos sitios (Isaifan y Baldauf 2020). Por tanto, aplicarlo en otros países requiere como referencia la identificación de una ciudad/estado de EEUU con la misma clasificación climática y latitud que la ciudad en estudio. Como desventaja, esto provocaría que los resultados difieran de los valores reales para el sitio de análisis.

Respecto al programa "CUFR Carbon Tree Calculator" (CCTC-Calculadora de Carbono de Árboles) también fue desarrollado por el Servicio Forestal de EEUU (USDA). Se ingresan datos como el DAP, la edad de los árboles, la zona climática y la antigüedad de los edificios cercanos (Russo *et al.* 2014). A partir de dicha información, el programa proporciona datos cuantitativos sobre el secuestro de CO_2 y los ahorros de energía para la calefacción/refrigeración de edificios, suministrada por árboles individuales. Está desarrollado para 16 ciudades de referencia de EEUU y sus principales especies (McPherson *et al.* 2013). Esto también se tradujo como una limitante a la hora de utilizarla en ciudades diferentes, por lo que los resultados obtenidos también podrían estar alejados de los datos reales para el caso de estudio.

Se observó también la utilización de "Kuka-Suite App", una aplicación desarrollada para el estudio del arbolado de la ciudad de La Paz, Bolivia (Pacheco Gutiérrez 2020). Se basa en datos relevados en campo (especie, altura y DAP) y utiliza ecuaciones alométricas para determinar el secuestro de CO_2. Actualmente esta aplicación no está disponible.

La ventaja de emplear alguno de estos programas radicó en que permiten obtener un escenario amplio de servicios ecosistémicos del arbolado urbano, partiendo de mediciones en campo o imágenes satelitales. Como desventaja, su uso fue limitado para ciudades no incluidas en la base de datos de los mismos. Se observó que los modelos requerían, además, una muestra de datos tomados en campo lo suficientemente representativa en cantidad para registrar la variabilidad y asegurar un ajuste válido estadísticamente (Boukili *et al.* 2017, Park 2018, Agbelade y Onyekwelu 2020).

En el cuadro 2 se resumieron las metodologías descritas, ordenadas según su frecuencia de aplicación y todas correspondientes a la época de medición de primavera-verano.

Cuadro 2. Metodologías aplicadas y variables medidas en los artículos analizados.

Applied methodologies and measured variables in the analyzed papers.

N°	Metodología aplicada	Variables medidas	Sitio de muestreo	Resultado obtenido
1	Modelos alométricos	DAP Altura Fotosíntesis neta Conductancia estomática Absorción de CO_2 Índice de área foliar	Parques y arbolado en alineación	Biomasa y CO_2 secuestrado
2	Software: i-Tree Eco	DAP Altura Especie Diámetro de copa Distancia a edificios	Parcelas circulares de 0,04 ha	CO_2 secuestrado
3	Software: i-Tree Canopy	Cobertura vegetal desde imagen satelital	Ciudad, arbolado en alineación y parques	CO_2 secuestrado
4	Software: CUFR Carbon Tree Calculator	DAP Altura Especie Diámetro de copa Distancia a edificios	Parcelas circulares de 0,04 ha	CO_2 secuestrado
5	Kuka-Suite App	DAP Altura Especie	Cuadrantes de 1 ha	CO_2 secuestrado

La mayoría de los artículos utiliza modelos alométricos, entre otros, Park *et al.* (2018), desarrollaron ecuaciones para especies de parques de la ciudad de Daejeon (Corea del Sur), con clima subtropical húmedo. Se estimó el volumen de la biomasa en función del DAP y del área de cobertura de la copa. Estimaron también que pueden eliminarse anualmente 793 toneladas de CO_2. Asimismo, Rodríguez *et al.* (2022) aplicaron un modelo para estudiar el arbolado urbano de Guadalajara (México), con clima mediterráneo, obteniendo un valor de 367,37 toneladas de carbono almacenado (que representa 1.348,25 toneladas de CO_2 removido de la atmósfera).

Las variables medidas para la determinación de CO_2 secuestrado se agruparon en dasométricas y fisiológicas. La mayoría de los autores analizados utilizaron como variables dasométricas, altura y DAP de los ejemplares estudiados.

Por otro lado, las variables fisiológicas incluyeron tasa fotosintética neta, conductancia estomática, absorción de CO_2 e índice de área foliar. La tasa fotosintética fue cuantificada con un medidor portátil de fotosíntesis, modelo LI-6400, de la marca LI-COR (Wang *et al.* 2021). Permitió la medición simultánea de fluorescencia de clorofila e intercambio de gases sobre la misma área foliar, caracterizando el proceso de fotosíntesis de la especie forestal en estudio. Como ventajas presentó la característica de ser portátil, lo que permitió la toma de datos en campo; además de contar con un programa de código abierto que puede personalizarse con ecuaciones o programas automáticos. Tor-Ngern y Leksungnoen (2020) emplearon el equipo portátil TARGAS-1, de la marca PP System, que incorpora dos analizadores de gases infrarrojos no dispersivos para CO_2 y H_2O. Contiene sensores para medición de temperatura del aire y PAR (por sus siglas en inglés, Radiación Fotosintéticamente Activa), almacenando los datos en una memoria portátil y permitiendo su transferencia a una computadora personal. Otro equipo de la misma marca utilizado por Weissert *et al.* (2017) se denomina CIRAS-2, es portátil y analiza fotosíntesis, conductancia estomática, transpiración e intercambio gaseoso. El equipo trabaja en condiciones de temperatura controlada y presión compensada para permitir la máxima fiabilidad de medida bajo ambientes fluctuantes.

Otras variables detectadas en el secuestro de CO_2 son la edad de los árboles (jóvenes o adultos), la velocidad de crecimiento y la periodicidad de la hoja (caducifolios o perennifolios).

Cuantificación de valores de CO_2 secuestrado

Se analizaron 31 ciudades con diferentes climas que reportaron datos de CO_2 secuestrado. La cantidad de ciudades varió según el tipo de clima, en referencia a la clasificación de Köppen-Geiger así como los valores promedio, obteniéndose 5 ciudades de clima A, 4 de clima B, 17 de clima C y 6 del clima D. El rango de valores promedio osciló entre 7,81 ton ha^{-1} para ciudades con climas continentales (D) a 217,3 ton ha^{-1} para ciudades de climas templados

(C) (cuadro 3). Wang *et al.* (2021) estudiaron el secuestro de CO_2 en Beijing-China, con clima tipo D, y obtuvieron un valor de 20,6 ton ha^{-1} mientras que Trlica *et al*. (2020) determinaron un secuestro de 0,5 ton ha^{-1} para Boston-EEUU, para el mismo clima. En ciudades de climas secos (B) el valor promedio fue 53,6 ton ha^{-1}. Esto representó un valor intermedio que merece ser explorado con mayor profundidad, para caracterizar la capacidad de estas ciudades de climas secos para mitigar el CO_2 en exceso.

De la revisión se desprende que, para algunos casos, los árboles están sólo en la periferia acorde a un modelo de ciudad compacta (Isaifan y Baldauf 2020), mientras que, en otros casos, están dentro de la trama consolidada propiciando el modelo urbano de ciudad-oasis (Martinez *et al.* 2014, Costemalle *et al.* 2023).

Con un tamaño muestral (n = 31) que correspondió a la cantidad de artículos que referencian el CO_2 secuestrado, se obtuvo una mediana de 3,86 ton ha^{-1}. Cabe aclarar que se realizó una homogenización de las unidades de los datos del secuestro, dado que de otro modo es limitante su interpretación. El valor de ton ha^{-1} fue calculado a partir de la conversión unificadora de las unidades de medida reportada en los artículos (ton $año^{-1}$, ton km^2, kg ha^{-1} entre otras) simplificando así la comparación entre los valores referenciados. El rango de secuestro de CO_2 va desde 0,42 a 1.901 ton ha^{-1}, con un rango de medias de 7,81 a 217,34 ton ha^{-1}.

Cuadro 3. Valores Mínimos, Máximos y Promedios de CO_2 secuestrado para las 31 ciudades analizadas.

Minimum, Maximum and Average values of CO_2 sequestered for the 31 analyzed cities.

Clima	**CO_2 secuestrado (ton ha^{-1})**		
	Promedio	Máximo	Mínimo
A-Tropical	61,74	223	1,1
B-Seco	53,6	168,83	0,56
C- Templado	217,34	1901	0,45
D-Continental	7,81	24	0,42

Los valores obtenidos –para un nivel de significancia de $P < 0,01$- indicaron una correlación lineal baja entre CO_2 secuestrado y temperatura (0,16) y no significativa ($P = 0,38$) sin correlación lineal entre el CO_2 secuestrado y precipitaciones anuales (0,04). Esto indicó que las variables no se relacionan de forma lineal, debido probablemente, a que los estudios fueron realizados en diversas áreas vegetadas de la ciudad, como plazas, parques y arbolado en alineación. Otros factores que pudieron influir en el rango de CO_2 secuestrado fueron la edad de los árboles, DAP, altura, especie, y configuración urbana (cuadro 4).

CONCLUSIONES

Se observa que el interés en la temática evidencia un aumento en los últimos años con más aportes a partir de 2020. Los valores obtenidos de CO_2 secuestrado difieren según la ciudad y el clima donde se desarrolló el estudio, puesto que son factores que influyen en la selección y el crecimiento de las especies utilizadas en el arbolado urbano.

La metodología utilizada para la cuantificación de este servicio ecosistémico también incide en el valor obtenido, dadas las particularidades de los programas computacionales utilizados (caso de i-Tree y CUFR-CCTC).

Esta información demuestra que los modelos alométricos constituyen una herramienta precisa de cuantificación del secuestro de CO_2, ya que utilizan datos locales -climáticos y relativos a los árboles-. En comparación con los modelos alométricos, se observa que los programas empleados presentan como fortalezas ser de acceso libre, de aplicación sencilla, utilizan datos tomados en campo o a partir de imágenes satelitales y permiten obtener resultados en forma rápida. Como debilidad se observa que los programas son originarios de ciudades de EEUU, México, Colombia y algunos países de Europa, por lo que, para su aplicación en otras localidades, debe elegirse como referencia una ciudad con el mismo clima y latitud o bien calibrarse con datos locales.

Por otro lado, es relevante aclarar el método utilizado para su cuantificación, dado que pueden existir diferencias al comparar los valores obtenidos para un mismo sitio. La

Cuadro 4. Análisis de correlación de Pearson entre CO_2 secuestrado, temperatura media del aire y régimen de precipitación anual. Salida de Infostat.

Pearson correlation analysis between sequestered CO_2, average air temperature and annual precipitation regime. From Infostat software.

	Secuestro de CO_2 (ton/ha)	Temperatura (ºC)	Precipitaciones (mm)
Secuestro de CO_2 (ton/ha)	1,00	0,38 ^{ns}	0,81 ^{ns}
Temperatura (ºC)	0,16	1,00	---
Precipitaciones (mm)	0,04	---	1,00

Nota: En la diagonal principal se observan las correlaciones de cada variable con sí misma. Este coeficiente es siempre 1 y no tiene valor interpretativo. Por debajo de la diagonal principal están los coeficientes de correlación calculados, y por encima los valores *p* correspondientes para las hipótesis nula y alternativa ($H_0 : p = 0$ vs. $H_1 : p \neq 0$); ^{ns} = no significativo.

elección del método a aplicar dependerá de los objetivos del análisis y de los recursos metodológicos como económicos disponibles. Del análisis realizado se observa que no todos los métodos proporcionan datos comparables de secuestro de CO_2, sería conveniente complementar -a modo de ajuste- los cálculos computacionales con mediciones en campo.

Se detecta que la edad del árbol influye en el secuestro de CO_2 dado que existen valores diferenciales entre árboles jóvenes y adultos. En ejemplares jóvenes, los valores son más mayores por sus altas tasas de crecimiento, no obstante, los adultos presentan mayor carbono acumulado por tener más biomasa. Una situación similar se observa en el caso de la comparación entre especies caducifolias y perennifolias, siendo estas últimas más eficientes en el secuestro anual de CO_2 por presentar tasas fotosintéticas altas durante el invierno cuando las especies caducifolias se encuentran en la fase fenológica de defoliación. Influye además la velocidad de crecimiento de la especie considerada, siendo aquellas que crecen con mayor rapidez las que secuestran más CO_2, en relación con las especies de crecimiento más lento.

Las ciudades emplazadas en climas áridos, sumado a los efectos del cambio climático y del fenómeno Isla de Calor Urbana, encuentran en el bosque urbano una estrategia eficaz para mitigar dichos efectos negativos. No sólo permiten atenuar la presencia de CO_2 como GEI, sino que proporcionan otros servicios ecosistémicos relevantes para la habitabilidad del entorno urbano. Si bien los valores de secuestro de CO_2 también son bajos en zonas tropicales y continentales, las ciudades con estos climas no presentan la fragilidad ambiental y la restricción de recursos forestales que sí se observan en ciudades áridas y su periferia.

De la revisión realizada, se destaca que el estudio de secuestro de CO_2 por el bosque urbano en climas con las mencionadas características está en incipiente desarrollo, puesto que sólo dos trabajos se llevaron adelante en ciudades con clima seco, para el periodo de análisis considerado y bajo la metodología descrita. Esto avala la necesidad de generar conocimiento a escala local, para la ciudad de Mendoza (Argentina) que presenta clima Bwk continental semiárido, pero que responde a un modelo urbano abierto de ciudad-oasis.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

La primera autora realizó el rastreo bibliográfico. En conjunto entre las tres autoras se diseñó y estructuró el trabajo. Cada una contribuyó a la discusión e interpretación de los resultados obtenidos y las tres autoras prepararon el manuscrito final.

FINANCIAMIENTO

El trabajo recibió el apoyo financiero por parte del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Agencia Nacional de Promoción de la Ciencia y Tecnología (ANPCyT) a través de los proyectos PICT 2018-3590 y PICT 2020-02444.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el valioso aporte en términos estadísticos de la Dra. Stella Maris Donato, personal de apoyo a la investigación (CPA INAHE-CCT Conicet Mendoza). También extendemos nuestro agradecimiento a los revisores por sus contribuciones.

REFERENCIAS

Acuña-Simbaqueva LM, HJ Andrade, MA Segura, E Sierra-Ramírez, DS Canal-Daza, OE Greñas-Corrales. 2021. Mitigation of greenhouse gas emissions from households by urban woodland in Ibagué-Colombia. *Ambiente e Sociedade* 24: 1-20. http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200191vu2021L3AO

Agbelade AD, JC Onyekwelu. 2020. Tree species diversity, volume yield, biomass and carbon sequestration in urban forests in two Nigerian cities. *Urban Ecosystems* 23(5): 957-970. https://doi.org/10.1007/s11252-020-00994-4

Alpaidze L, J Salukvadze. 2023. Green in the City: Estimating the Ecosystem Services Provided by Urban and Peri-Urban Forests of Tbilisi Municipality, Georgia. *Forests* 14(1): 121. https://doi.org/10.3390/f14010121

Ariluoma M, J Ottelin, R Hautamäki, E M Tuhkanen, M Mänttäri. 2020. Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: A case study from Helsinki. *Urban Forestry and Urban Greening* 57: 1-12. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126939

Bherwani H, T Banerji, R Menon. 2022. Role and value of urban forests in carbon sequestration: review and assessment in Indian context. *Environment, Development and Sustainability* 26: 603–626. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02725-5

Boukili VKS, DP Bebber, T Mortimer, G Venicx, D Lefcourt, M Chandler, C Eisenberg. 2017. Assessing the performance of urban forest carbon sequestration models using direct measurements of tree growth. *Urban Forestry and Urban Greening* 24: 212-221. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.015

Castillo Ruperti RJ, VE Bello Pinargote, YS Loor Barrezueta, CC Ayón Hidalgo. 2022. Captura de carbono del arbolado de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad* 5: 1-18. https://doi.org/10.46380/rias.vol5.e262

Costemalle VB, HMN Candido, FA Carvalho. 2023. An estimation of ecosystem services provided by urban and peri-urban forests: a case study in Juiz de Fora, Brazil. *Ciencia Rural* 53(4). https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210208

Di Rienzo JA, F Casanoves, MG Balzarini, L González, M Tablada, YC Robledo. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en: http://www.infostat.com.ar

Dobbs C, J Hernández, F Escobedo. 2011. Ecuaciones de biomasa aérea y área foliar basadas en métodos no destructivos para árboles urbanos de dos comunas de Chile Central.

Bosque 32(3): 287-296. https://doi.org/10.4067/S0717-92002011000300010

Duval VS, ME Arias, JP Celemin. 2023. Carbon sequestration in urban trees of Bahía Blanca, Argentina. *Boletín de Estudios Geográficos* 119*:* 35–51. https://doi.org/10.48162/rev.40.027

FAO (Food and Agriculture Organization). 2016. Directrices para la silvicultura urbana y periurbana. F Salbitano, S Borelli, M Conigliaro e Y Chen. Estudio FAO: Montes, Nº 178. Roma.

Fujimoto M, L Puangchit, F Sugawara, D Sripraram, W Jiamjeerakul, H Kato. 2016. Carbon Sequestration Estimation of Urban Trees in Parks and Streets of Bangkok Metropolitan, Thailand. *Thai Journal of Forestry* 35(3): 30-41.

Gomes Pires de Paula G, CR de Souza, VA Maia, N de Aguiar-Campos, NCA Fagundes, FM Gianasi, DT Girardelli, A de J Rodrigues Pais, WB da Silva, RM dos Santos. 2020. Study of the floristic, functional and phylogenetic composition of trees in a short time in a forest fragment of the atlantic forest, Brazil. *Bosque* 41(3): 261-276. http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002020000300261

Gratani L, L Varone, A Bonito. 2016. Carbon sequestration of four urban parks in Rome. *Urban Forestry and Urban Greening* 19: 184-193. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.07.007

Hasse D. 2019. The Rural-Urban Gradient and Ecosystem Services. *In* Schröter M, A Bonn, S Klotz, C Baessler. Atlas of Ecosystem Services. Springer, Cham. p. 141-146. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96229-0_23

Hernández-Castán J, E Cuesta Mejía, B Ortiz Espejel, E Rosano Reyes. 2022. Servicios ecosistémicos del arbolado urbano en la Laguna de San Baltazar, Puebla, mediante el uso del software i-Tree. *CIENCIA Ergo-Sum* 30 (2): 1-11. https://doi.org/10.30878/ces.v30n2a5

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 35-115. https://doi.org/ 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Isaifan RJ, RW Baldauf. 2020. Estimating Economic and Environmental Benefits of Urban Trees in Desert Regions. *Frontiers in Ecology and Evolution* 8 (16):1-14. https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00016

Kim G, P Coseo. 2018. Urban Park Systems to Support Sustainability: The Role of Urban Park Systems in Hot Arid Urban Climates. *Forests* 9 (7). http://doi.org/10.3390/f9070439

Kinnunen A, I Talvitie, J Ottelin, J Heinonen, S Junnila. 2022. Carbon sequestration and storage potential of urban residential environment – A review. *Sustainable Cities and Society* 84: 1-12. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104027

Koricho HH, AD Seboka, F Fufa, T Gebreyesus, S Song. 2022. Study on the ecosystem services of urban forests: implications for climate change mitigation in the case of Adama City of Oromiya Regional Sate, Ethiopia. *Urban Ecosystems* 25 (2): 575-584. https://doi.org/10.1007/s11252-021-01152-0

López-López SF, T Martínez-Trinidad, H M Benavides-Meza, M García-Nieto, G Ángeles-Pérez. 2018. Biomass and carbon storage in trees of the first section of Chapultepec park, Mexico city. *Madera y Bosques* 24 (3): 1-14. https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431620

Lozano Sivisaca DC, BG Palacios Herrera, ZH Aguirre Mendoza. 2018. Modelos Alométricos Para Estimar El Almacenamiento De Carbono De Bosques Montanos Bajos En El Sur Del Ecuador. *Ciência Florestal* 28(3): 1328–1339. https://doi.org/10.5902/1980509833464

Majumdar T, T Selvan. 2018. Carbon Storage in Trees of Urban and Peri-urban Forests of Agartala, Tripura. *IAETSD Journal For Advanced Research In Applied Sciences* 5 (2): 715-731.

Martinez CF, MA Cantón, FA Roig Juñent. 2014. Incidencia del déficit hídrico en el crecimiento de árboles de uso urbano en ciudades de zonas áridas: Caso de Mendoza, Argentina. *Interciencia* 39 (12): 890-897.

Martínez-Trinidad T, PH López, SF López-López, LM Caballero. 2021. Diversity, structure and ecosystem services of trees in four parks in Texcoco using i-Tree Eco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12 (67): 202-223. https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i67.880

McPherson EG, Q Xiao, E Aguaron. 2013. A new approach to quantify and map carbon stored, sequestered and emissions avoided by urban forests. *Landscape and Urban Planning* 120: 70–84. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.08.005

Ning ZH, R Chambers, K Abdollahi. 2016. Modeling air pollutant removal, carbon storage, and CO_2 sequestration potential of urban forests in Scotlandville, Louisiana, USA. *iForest* 9(6): 860-867. https://doi.org/10.3832/ifor1845-009

Nowak DJ, S Hirabayashi, A Bodine, E Greenfield. 2014. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution* 193: 119–129. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.05.028

ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2015. Consultado en 2023. Disponible en: https://www.un.org

Oviantari MV, IM Gunamantha, NP Ristiati, IMPA Santiasa, PPY Astariani. 2018. Carbon sequestration by above-ground biomass in urban green spaces in Singaraja city. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 200(1): 1-7. https://doi.org/10.1088/1755-1315/200/1/012030

Pacheco Gutiérrez CA. 2020. Estimation of the storage and retention of carbon dioxide by the public urban forest of the area of Achumani in La Paz city through a mobile application. *Fides et ratio-Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad de La Salle en Bolivia* 19(19): 153-174.

Park JH, SG Baek, MY Kwon, SM Je, SY Woo. 2018. Volumetric equation development and carbon storage estimation of urban forest in Daejeon, Korea. *Forest Science and Technology* 14(2): 97-104. https://doi.org/10.1080/21580103.2018.1452799

Plan Local de Acción Climática de la Ciudad de Mendoza. Consultado en 2023. Disponible en: https://www.ramcc.net/municipio.php?m=147

Pregitzer CC, C Hanna, S Charlop-Powers, MA Bradford. 2022. Estimating carbon storage in urban forests of New York City. *Urban Ecosystems* 25(2): 617-631. https://doi.org/10.1007/s11252-021-01173-9

Rodríguez Matos Y, A Ajete Hernández, S Orta Pozo, D N Rondón González, J R Rivera Díaz. 2018. Comportamiento del carbono retenido en el arbolado urbano en el sur de la ciudad de Guantánamo. *Revista Cubana de Ciencias Forestales* 6(3): 284-299.

Rodríguez R de JJ, AG Rodríguez, EH Álvarez, JLS Ramírez, AG González. 2022. Estimation of carbon stored in urban trees

in Guadalajara, Jalisco, Mexico, using Biometric models. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research* 5(1): 224-240. https://doi.org/10.34188/bjaerv5n1-018

Russo A, FJ Escobedo, N Timilsina, AO Schmitt, S Varela, S Zerbe. 2014. Assessing urban tree carbon storage and sequestration in Bolzano, Italy. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management* 10(1): 54-70. https://doi.org/10.1080/21513732.2013.873822

Segura M, M Kanninen. 2005. Allometric Models for Tree Volume and Total Aboveground Biomass in a Tropical Humid Forest in Costa Rica. *Biotropica: The Journal of Biology and Conservation* 37(1): 2-8. https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.02027.x

Singh AK, VK Nair, H Singh, RK Mishra, JS Singh. 2022. Carbon Storage and Carbon Dioxide Sequestration by Urban Tree Cover: Case Study From Varanasi, India. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences* 92(3): 647-657. https://doi.org/10.1007/s40011-022-01348-0

Snehlata, A Rajlaxmi, M Kumar. 2021. Urban tree carbon density and CO_2 equivalent of National Zoological Park, Delhi. *Environmental Monitoring and Assessment* 193:1-13. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09619-5

Steenberg JWN, M Ristow, PN Duinker, L Lapointe-Elmrabti, JD MacDonald, DJ Nowak, J Pasher, C Flemming, C Samson. 2023. A national assessment of urban forest carbon storage and sequestration in Canada. *Carbon Balance and Management* 18(11):1-13. https://doi.org/10.1186/s13021-023-00230-4

Tan X, S Hirabayashi, S Shibata. 2021. Estimation of ecosystem services provided by street trees in Kyoto, Japan. *Forests* 12(3):1-21. https://doi.org/10.3390/f12030311

Tang Y, A Chen, S Zhao. 2016. Carbon storage and sequestration of urban street trees in Beijing, China. *Frontiers in Ecology and Evolution* 4(53):1-8. https://doi.org/10.3389/fevo.2016.00053

Tor-Ngern P, N Leksungnoen. 2020. Investigating carbon dioxide absorption by urban trees in a new park of Bangkok, Thailand. *BMC Ecology* 20(20):1-10. https://doi.org/10.1186/s12898-020-00289-4

Tripathi M, H Joshi. 2015. Carbon flow in Delhi urban forest ecosystems. *Annals of Biological Research*, 6(8): 13-17.

Trlica A, LR Hutyra, LL Morreale, IA Smith, AB Reinmann. 2020. Current and future biomass carbon uptake in Boston's urban forest. *Science of the Total Environment* 709:1-10. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136196

Unicipio - Gobierno de Mendoza. 2020. Censo Forestal Georreferenciado. Consultado en 2023. Disponible en: https://miarbol.mendoza.gov.ar

USDA (United States Department of Agriculture). 2006. Software i-Tree. Consultado en 2023. Disponible en: https://www.itreetools.org/

Vargas-Hernández JG, J Zdunek-Wielgołaska. 2021. Urban green infrastructure as a tool for controlling the resilience of urban sprawl. *Environment, Development and Sustainability* 23: 1335-1354. https://doi.org/10.1007/s10668-020-00623-2

Vásquez AE. 2016. Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande* 63: 63-86.

Velasco E, M Roth, L Norford, LT Molina. 2016. Does urban vegetation enhance carbon sequestration? *Landscape and Urban Planning* 148: 99-107. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.003

Wang XM, XK Wang, Y B Su, HX Zhang. 2019. Land pavement depresses photosynthesis in urban trees especially under drought stress. *Science of the Total Environment* 653: 120-130. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.281

Wang Y, Q Chang, X Li. 2021. Promoting sustainable carbon sequestration of plants in urban greenspace by planting design: A case study in parks of Beijing. *Urban Forestry and Urban Greening* 64:1-13. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127291

Weissert LF, JA Salmond, L Schwendenmann. 2014. A review of the current progress in quantifying the potential of urban forests to mitigate urban CO_2 emissions. *Urban Climate* 8: 100–125. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.01.002

Weissert LF, JA Salmond, L Schwendenmann. 2017. Photosynthetic CO_2 uptake and carbon sequestration potential of deciduous and evergreen tree species in an urban environment. *Urban Ecosystems* 20: 663-674. https://doi.org/10.1007/s11252-016-0627-0

Yao X, M Zhao, FJ Escobedo. 2017. What causal drivers influence carbon storage in Shanghai, China's urban and peri-urban forests? *Sustainability* 9(4):1-17. https://doi.org/10.3390/su9040577

Zhao H, D Zhao, X Jiang, S Zhang, Z Lin. 2023. Assessment of Urban Forest Ecological Benefit Based on the i-Tree Eco Model—A Case Study of Changchun Central City. *Forests* 14(7):1-17. https://doi.org/10.3390/f14071304

Recibido: 16.06.2024
Aceptado: 27.02.2025