



# Evaluación de los servicios ambientales del bosque urbano "Caja de Agua" (Lima, Perú) mediante i-Tree Eco y i-Tree Canopy

## Assessment of the environmental services of the "Caja de Agua" urban forest (Lima, Peru) using i-Tree Eco and i-Tree Canopy

Rosa Huaman<sup>1,\*</sup>, José Giacomotti<sup>2</sup> y Arlet Calixto<sup>3</sup>

---

**Recibido:** 14 abril 2024 | **Aceptado:** 29 julio 2024 | **Publicado en línea:** 19 agosto 2024

**Citación:** Huaman, R; Giacomotti, J; Calixto, A. 2024. Evaluación de los servicios ambientales del bosque urbano "Caja de Agua" (Lima, Perú) mediante i-Tree Eco y i-Tree Canopy. Revista Forestal del Perú 39(1): 166-186. DOI: <https://doi.org/10.21704/rfp.v39i1.2174>

---

### Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el bosque urbano "Caja de Agua" de 3.06 ha, ubicada en el distrito de San Juan Lurigancho, en la provincia de Lima, Perú, utilizando los programas i-Tree Eco y i-Tree Canopy. Se realizó un censo forestal en el área de estudio en el cual se midieron todos los individuos arbóreos y arborescentes con un diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor a 2.5 cm a 1.30 m del suelo. Se registraron un total de 765 individuos, agrupados en 43 especies, 40 géneros y 22 familias botánicas. Con i-Tree Eco se estimaron los servicios ambientales proporcionados por el arbolado de "Caja de Agua", los cuales fueron la eliminación de 256.9 kg/año de contaminantes del aire (CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>), la captura anual de 16.44 toneladas métricas de carbono, el almacenamiento de 172 toneladas métricas de carbono y la producción de 43.83 toneladas métricas de oxígeno al año. Las especies forestales que otorgaron los mayores servicios ambientales fueron *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., *Ligustrum lucidum* W.T. Aiton, *Fraxinus americana* L. y *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna, influenciadas por su abundancia y área foliar. Utilizando el programa i-Tree Canopy se clasificaron cuatro tipos de cobertura en el bosque urbano "Caja de Agua" (arbórea/arbustiva, suelo desnudo, herbácea y construcciones) mediante la fotointerpretación de imágenes satelitales disponibles en Google Earth, determinando una disminución de su cobertura arbórea en los últimos 14 años. Los resultados indican que el bosque urbano "Caja de Agua" proporciona servicios ambientales para la ciudad, el cual debe ser conservado para el beneficio de la comunidad local.

**Palabras clave:** áreas verdes, árboles, captura de carbono, producción de oxígeno, contaminantes del aire

---

<sup>1</sup> ONG Ficus Perú Desarrollo Socioambiental, Lima, Perú.

<sup>2</sup>Departamento de Manejo Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Av. La Molina s/n, La Molina, Lima, Perú.

<sup>3</sup>Investigador independiente.

\* Autor de Correspondencia: [rosahuaman.forestal@gmail.com](mailto:rosahuaman.forestal@gmail.com)

### Abstract

The objective of this study was to evaluate the "Caja de Agua" urban forest of 3.06 ha located in the district of San Juan Lurigancho in the province of Lima, Peru, using the i-Tree Eco and i-Tree Canopy programs. A forest census was conducted in the study area in which all tree and arborescent individuals with a diameter at breast height (DBH) greater than 2.5 cm at 1.30 m from the ground were measured. In total, 765 individuals were recorded, grouped into 43 species, 40 genera and 22 botanical families. With the i-Tree Eco program, the environmental services provided by the "Caja de Agua" trees were estimated, which were the elimination of 256.9 kg/year of air pollutants (CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), the annual capture of 16.44 metric tons of carbon, the storage of 172 metric tons of carbon and the production of 43.83 metric tons of oxygen per year. It was determined that the forest species that provided the greatest environmental services were *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., *Ligustrum lucidum* W.T. Aiton, *Fraxinus americana* L. and *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna, influenced by their abundance and leaf area. The i-Tree Canopy program was used to classify four types of cover in the "Caja de Agua" urban forest (arboreal/shrub, bare soil, herbaceous and constructions) by photointerpreting satellite images available in Google Earth, which determined that there has been a decrease in tree cover in the last 14 years. The results indicate that the "Caja de Agua" urban forest provides environmental services for the city, which should be conserved for the benefit of the local community.

**Key words:** green areas, trees, carbon capture, oxygen production, air pollutants

### Introducción

Las ciudades hoy en día se enfrentan a diferentes problemas causados por la contaminación ambiental. Perú ocupa el tercer puesto del ranking de los países más contaminados de América Latina y el Caribe (IQAir 2024), siendo Lima la ciudad más contaminada del país, con niveles de contaminación que varían por distritos. Carabayllo, Pachacamac y Ate están en la categoría de "Muy alto", mientras que San Juan de Lurigancho presenta una contaminación del aire promedio de 23.1 ug/m<sup>3</sup> que lo ubica en la categoría de "Moderado". Este valor es 5.1 veces más que el valor de calidad de aire establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (IQAir 2024). Esta alta contaminación genera efectos negativos en la salud a corto y largo plazo, como el mayor riesgo por infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas, accidentes cerebrovasculares y cáncer de pulmón, ocasionando aproximadamente 2 300 muertes prematuras anuales en la ciudad de Lima (Gonzales *et al.* 2014).

En las ciudades, los árboles pueden formar redes conocidas como bosques urbanos, que representan la columna vertebral de la infraes-

tructura verde (FAO 2017). Los árboles generan servicios ambientales que mejoran la calidad de vida de los habitantes de las ciudades, mediante la reducción de la temperatura de las superficies en áreas pavimentadas, controlan la radiación ultravioleta, disminuyen los niveles de ruido por absorción, desviación y reflexión, capturan y almacenan carbono, mejoran la calidad del aire mediante la absorción de material particulado y proporcionan hábitats para la vida silvestre en los alrededores urbanos (Benito y Palermo-Arce 2021).

El paquete i-Tree ayuda a mejorar la gestión de los bosques urbanos mediante la cuantificación de sus servicios ambientales, su valor económico y su estructura forestal. De todas las herramientas del paquete de i-Tree, desarrolladas por el Servicio Forestal de Estados Unidos, dos pueden ser utilizadas en América Latina: i-Tree Eco, que se basa en la información de los inventarios de los bosques urbanos, en datos meteorológicos locales y de contaminantes en el área de interés, para determinar la estructura, los efectos ambientales y su valor económico; y i-Tree Canopy, que permite la fotointerpretación de imágenes

satelitales de Google Earth para determinar los diferentes tipos de coberturas que hay en el suelo y estimar servicios ambientales (Nowak 2021). Ambos programas se encuentran disponibles y son gratuitos. El programa i-Tree Eco se descarga libremente en <https://www.itreetools.org/home-es/i-tree-tools-download-es>, y i-Tree Canopy se utiliza en línea de forma gratuita mediante el enlace <https://canopy.itreetools.org/>.

Aunque inicialmente fue diseñado para proyectos en Estados Unidos, el paquete de i-Tree se usa en Europa y América Latina, por ejemplo, para el arbolado en ciudades como Barcelona (Orellana 2022) y Madrid (Fernández 2022) en España. En América, i-Tree Eco se ha aplicado en áreas verdes de Colombia (Arroyave-Maya *et al.* 2019), parques de México en Texcoco (Martínez-Trinidad *et al.* 2021) y Puebla (Hernández-Castán *et al.* 2023), y en parques de Lima (Arévalo-Gómez y Alcántara-Boza 2021).

La presente investigación se desarrolló en el bosque urbano “Caja de Agua”, en San Juan de Lurigancho, en la provincia de Lima, Perú, siendo un área que otorga beneficios ambien-

tales a este distrito, el más poblado de Lima. Los objetivos de la presente investigación fueron caracterizar el bosque urbano “Caja de Agua” en base a su composición florística, cuantificar los servicios ambientales que ofrece (captura y almacenamiento de carbono, la eliminación de contaminantes del aire y la producción de oxígeno), identificar las especies forestales que generaron los mayores servicios ambientales utilizando el programa i-Tree Eco y determinar la pérdida de cobertura arbórea en los últimos 14 años mediante el uso del programa i-Tree Canopy.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El bosque urbano “Caja de Agua” fue creado en la década de 1950 y está ubicado en el distrito de San Juan de Lurigancho, provincia y departamento de Lima, a una altitud de 300 msnm y dentro del ecosistema denominado desierto costero (MINAM 2019). Presenta una extensión de 3.06 ha (Figura 1 y Figura 2) y se caracteriza por conservar diferentes especies forestales como *Eucalyptus camaldulensis*



Figura 1. Bosque urbano “Caja de Agua”, San Juan de Lurigancho, Lima, Perú. Foto: Ramón Fernández.

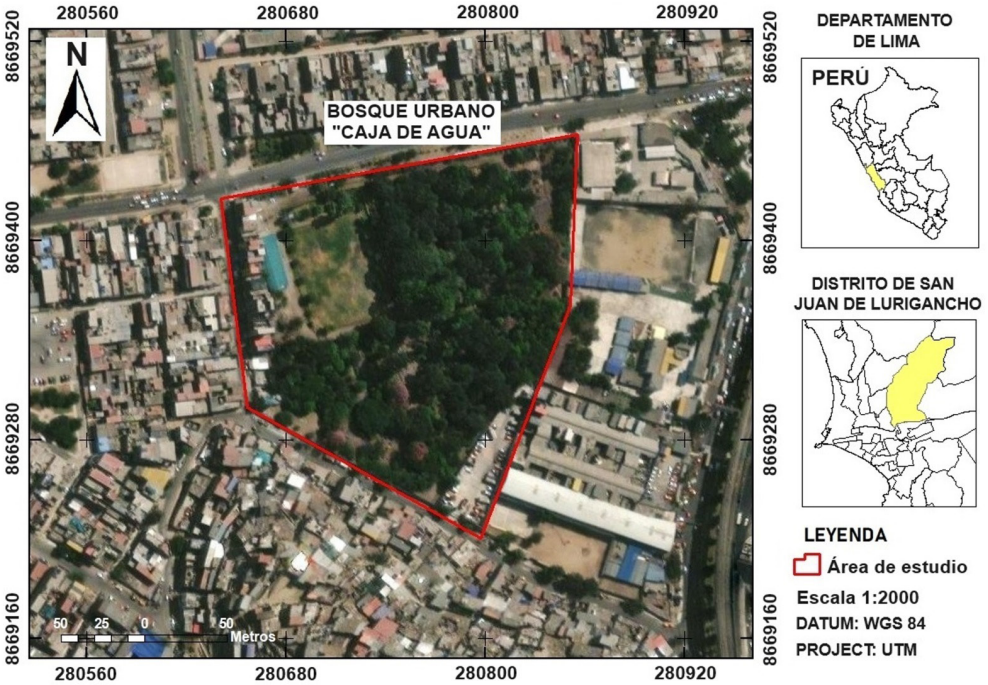


Figura 2. Mapa de ubicación del bosque urbano “Caja de Agua”, San Juan de Lurigancho, Lima, Perú.

Dehnh. “eucalipto”, *Melia azedarach* L. “melia”, *Ficus benjamina* L. “ficus”, *Koelreuteria paniculata* Laxm. “papelillo”, *Casuarina equisetifolia* L. “casuarina”, *Fraxinus americana* L. “fresno”, *Schinus terebinthifolia* Raddi “molle costeño”.

**Censo forestal**

En el año 2022 se realizó un censo forestal de todos los individuos arbóreos con DAP (diámetro a la altura del pecho) mayor a 2.5 cm, medido a 1.3 m desde el suelo. Las variables evaluadas fueron especie, DAP, altura total, la altura copa viva, la altura de la base de copa, el porcentaje de muerte regresiva, el ancho de copa, el porcentaje de copa faltante y la exposición de la luz. Esta información fue sistematizada en el programa Excel.

**Sistematización de datos**

Se actualizó el nombre de la especie, género y familia con el *Angiosperm Phylogeny Group* (APG 2016). Las especies fueron clasificadas por su origen y hábito utilizando fuentes bi-

bliográficas (Vásquez *et al.* 2018, Santa Cruz *et al.* 2021, Orellana *et al.* 2023). Se determinó la composición florística a nivel de géneros y familias, la abundancia y la diversidad de especies con el uso del programa Excel. Por último, se calculó el índice de diversidad de Shannon-Wiener ( $H'$ ) en base 2 con el uso del programa PAST (Hammer *et al.* 2001).

**Análisis con el programa i-Tree Eco**

Los datos del censo forestal fueron importados y procesados en el programa i-Tree Eco. Como resultado, se obtuvo un reporte que contiene información sobre la estructura horizontal del arbolado, el índice de valor de importancia (IVI) de las especies y la cuantificación de los servicios ambientales, como la eliminación de contaminantes del aire, la captura y almacenamiento de carbono, la producción de oxígeno y el valor económico del arbolado en términos de almacenamiento de carbono.

El programa i-Tree Eco calcula el Índice de Valor de importancia (IVI) sumando el por-

centaje de la abundancia y el porcentaje del área foliar de las especies. El área foliar, expresada en  $m^2$ , se calcula con una ecuación que incluye la altura y el ancho de la copa, el factor de sombra y la superficie de la copa (Orellana 2022). El factor de sombra se define como el porcentaje de luz solar que incide en la copa de un árbol y que no se transmite a través de los huecos, siendo más alto en árboles con copas densas.

La estimación por la eliminación de los principales contaminantes del aire (Ozono ( $O_3$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), material particulado menor a 2.5 micrones ( $PM_{2.5}$ ) y material particulado menor a 10 micrones y mayor a 2.5 micrones ( $PM_{10}$ )), se basa en el modelo de "Deposición Seca" de la contaminación del aire (eliminación de la contaminación en períodos sin precipitaciones) que usa datos sobre la concentración de contaminantes ( $O_3$ , CO,  $SO_2$ ,  $NO_2$  y  $PM_{2.5}$ ), la superficie foliar saludable de los árboles y el estado del tiempo (Orellana 2022). La información fue obtenida de la Estación Meteorológica Jorge Chávez del Aeropuerto del Callao (Lima), la única estación que se encuentra disponible dentro del programa i-Tree Eco para la ciudad de Lima.

Para el almacenamiento de carbono (toneladas métricas), el programa i-Tree Eco usa ecuaciones alométricas de biomasa y datos de medición de los árboles en pie. Mientras que, para la captura de carbono (toneladas métricas/año), i-Tree Eco utiliza el diámetro del árbol y agrega el crecimiento del diámetro promedio de su género, la clase diamétrica y la condición del árbol para estimar el diámetro de los árboles junto con el almacenamiento de carbono por año (Ortiz 2020).

La producción de oxígeno se obtiene a partir de la captura de carbono, donde la liberación neta de  $O_2$  (toneladas/año) es igual a la captura de carbono (toneladas/año) (González-Hernández *et al.* 2023). Estas estimaciones están directamente relacionadas con la de captura de carbono debido a que cuando los árboles capturan dióxido de carbono

( $CO_2$ ) durante el proceso de fotosíntesis, estos desprenden oxígeno ( $O_2$ ). Del mismo modo, cuando liberan dióxido de carbono ( $CO_2$ ) a través de su descomposición, se consume oxígeno ( $O_2$ ) (Nowak 2021).

El programa i-Tree Eco calculó el valor económico del almacenamiento de carbono. Para ello, se ingresó el precio del carbono almacenado, basado en el precio social del carbono en Perú de \$ 7.17 por tonelada de  $CO_2$  equivalente (Ministerio de Economía y Finanzas 2021), considerando que la relación de pesos moleculares de  $CO_2$  (44) y C (12) es de 3.67, esto se interpreta que para almacenar una tonelada de carbono (C) se requieren capturar 3.67 toneladas de  $CO_2$  equivalente de la atmósfera. Con esta relación de 3.67, se determinó que el precio de 1 tonelada de carbono almacenado es de \$ 26.31 ( $3.67 \times \$7.17$ ). Este valor de \$ 26.31 se multiplicó por el total de toneladas de carbono almacenado en el arbolado del bosque urbano "Caja de Agua", obteniendo así su valor económico.

### Clasificación de los tipos de cobertura con i-Tree Canopy

Se delimitó el polígono del área del bosque urbano "Caja de Agua" con el programa *online* i-Tree Canopy. Se realizó la fotointerpretación de 200 puntos aleatorios de la imagen satelital que se visualiza en el programa clasificándolos en cuatro tipos de cobertura: i) Arbórea/arbustiva, ii) Suelo desnudo, iii) Herbáceas y iv) Construcciones. Para analizar la variación temporal del tipo de coberturas en los últimos años, los puntos fueron reclasificados usando el histórico de imágenes satelitales de Google Earth obtenidos del año 2010.

## Resultados

### Diversidad arbórea y abundancia

La composición florística está conformada por 765 individuos arbóreos y arborescentes de 43 especies agrupadas en 40 géneros y 22 familias botánicas. Siendo las cinco especies con mayor abundancia el *Ligustrum lucidum* W.T. Aiton (167), *Fraxinus americana* L. (92), *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. (66), *Ficus*

*benjamina* L. (51) y *Spathodea campanulata* P. Beauv. (50). Asimismo, los géneros con mayor abundancia fueron *Ligustrum* (167), *Fraxinus* (92), *Eucalyptus* (66), *Ficus* (55) y *Spathodea* (50). Mientras que, las familias con mayor cantidad de individuos fueron Oleaceae (259), Arecaceae (69), Myrtaceae (66), Bignoniaceae (60) y Moraceae (58) (Cuadro 1). Como resultado, se obtuvo que el índice de diversidad de Shannon-Wiener (en base 2) fue de 4.06.

En el bosque urbano “Caja de Agua” se identificaron 43 especies. Según su origen 34 son especies introducidas del extranjero, 5 introducidas de la sierra, 3 introducidas de la selva y 1 es nativa de la costa (Cuadro 2). En cuanto a su hábito, 33 son árboles, 6 palmeras, 2 herbáceas perennes, 1 palmeto arborescente y 1 suculenta (Cuadro 2).

### Estructura horizontal del arbolado

El arbolado de “Caja de Agua” se clasificó en 8 categorías diamétricas, presentando una

asimetría positiva, lo que indica que la mayoría de los individuos se encuentran en las categorías de menor diámetro. La clase 1, con un DAP entre 2.5 a 7.6 cm, concentró 96 individuos; la clase 2, con un DAP entre 7.6 a 15.2 cm, registró 206 individuos; y la clase 3, con un DAP entre 15.2 a 30.5 cm, presentó 298 individuos (Figura 3). A partir de las clases mayores a 30.5 cm de DAP, la abundancia disminuye.

### Índice de valor de importancia (IVI) de las especies del arbolado

El índice de valor de importancia (IVI) de las especies forestales es la suma del porcentaje de la abundancia y el porcentaje del área foliar de estas especies. Las especies con mayor abundancia relativa fueron *Ligustrum lucidum* (21.80 %), *Fraxinus americana* (12%), *Eucalyptus camaldulensis* (8.60%), *Ficus benjamina* (6.70 %) y *Spathodea campanulata* (6.50 %). Mientras que, las especies con mayor porcentaje de área foliar (área foliar relativa) fueron *Eucalyptus*

Especies con mayor abundancia relativa (%)	Géneros con mayor abundancia relativa (%)	Familias con mayor abundancia relativa (%)
<i>Ligustrum lucidum</i> : 21.8% (167 indiv.)	<i>Ligustrum</i> : 21.8% (167 indiv.)	Oleaceae: 33.9% (259 indiv.)
<i>Fraxinus americana</i> : 12% (92 indiv.)	<i>Fraxinus</i> : 12% (92 indiv.)	Arecaceae: 9% (69 indiv.)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> : 8.6% (66 indiv.)	<i>Eucalyptus</i> : 8.6% (66 indiv.)	Myrtaceae: 8.6% (66 indiv.)
<i>Ficus benjamina</i> : 6.7% (51 indiv.)	<i>Ficus</i> : 7.2% (55 indiv.)	Bignoniaceae: 7.8% (60 indiv.)
<i>Spathodea campanulata</i> : 6.5% (50 indiv.)	<i>Spathodea</i> : 6.5% (50 indiv.)	Moraceae: 7.6% (58 indiv.)
<i>Melia azedarach</i> : 6% (46 indiv.)	<i>Melia</i> : 6% (46 indiv.)	Meliaceae: 6.1% (47 indiv.)
<i>Dypsis lutescens</i> : 5% (38 indiv.)	<i>Dypsis</i> : 5% (38 indiv.)	Anacardiaceae: 5.2% (40 indiv.)
<i>Ceiba speciosa</i> : 4.8% (37 indiv.)	<i>Schinus</i> : 5% (38 indiv.)	Malvaceae: 5% (38 indiv.)
<i>Koelreuteria paniculata</i> : 3.9% (30 indiv.)	<i>Ceiba</i> : 4.8% (37 indiv.)	Sapindaceae: 4.6% (35 indiv.)
<i>Schinus terebinthifolia</i> : 3.9% (30 indiv.)	<i>Koelreuteria</i> : 3.9% (30 indiv.)	Musaceae: 3.1% (24 indiv.)
Resto de especies: 20.7% (158 indiv.)	Resto de géneros: 19.1% (146 indiv.)	Resto de familias: 9% (69 indiv.)
Total de individuos: 100% (765 indiv.)	Total de individuos: 100% (765 indiv.)	Total de individuos: 100% (765 indiv.)

**Cuadro 1.** Abundancia relativa y número de individuos por especies, géneros y familias en el bosque urbano “Caja de Agua” en Lima.

Familia	Nombre común	Especie	Origen	Hábito	Nº de individuos
Oleaceae	Aligustre	<i>Ligustrum lucidum</i> W.T. Aiton	Introducida	Árbol	167
Oleaceae	Fresno	<i>Fraxinus americana</i> L.	Introducida	Árbol	92
Myrtaceae	Eucalipto	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh.	Introducida	Árbol	66
Moraceae	Ficus	<i>Ficus benjamina</i> L.	Introducida	Árbol	51
Bignoniaceae	Tulipán africano	<i>Spathodea campanulata</i> P. Beauv.	Introducida	Árbol	50
Meliaceae	Melia	<i>Melia azedarach</i> L.	Introducida	Árbol	46
Arecaceae	Palmera hawaiana	<i>Dyopsis lutescens</i> (H. Wendl.) Beentje & J. Dransf.	Introducida	Palmera	38
Malvaceae	Ceibo	<i>Ceiba speciosa</i> (A. St.-Hil.) Ravenna	Selva	Árbol	37
Sapindaceae	Papelillo	<i>Koelerutera paniculata</i> Laxm.	Introducida	Árbol	30
Anacardiaceae	Molle costeño	<i>Schinus terebinthifolia</i> Raddi	Introducida	Árbol	30
Musaceae	Plátano	<i>Musa × paradisiaca</i> L.	Introducida	Herbácea perenne	24
Caricaceae	Papaya	<i>Carica papaya</i> L.	Introducida	Herbácea perenne	20
Arecaceae	Palmera bruja	<i>Syagrus romanzoffiana</i> (Cham.) Glassman	Introducida	Palmera	17
Fabaceae	Ponciana	<i>Delonix regia</i> (Bojer ex Hook.) Raf.	Introducida	Árbol	11
Arecaceae	Palmera abanico	<i>Washingtonia robusta</i> H. Wendl.	Introducida	Palmera	10
Casuarinaceae	Casuarina	<i>Casuarina equisetifolia</i> L.	Introducida	Árbol	9
Rutaceae	Limón	<i>Citrus × limon</i> (L.) Osbeck	Introducida	Árbol	8
Anacardiaceae	Molle serrano	<i>Schinus molle</i> L.	Sierra	Árbol	8
Bignoniaceae	Jacarandá	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	Introducida	Árbol	5
Sapindaceae	Falso boliche	<i>Harpullia arborea</i> (Blanco) Radlk.	Introducida	Árbol	4
Scrophulariaceae	Mioporo	<i>Myoporum laetum</i> G. Forst.	Introducida	Árbol	4
Lauraceae	Palta	<i>Persea americana</i> Mill.	Introducida	Árbol	4
Bignoniaceae	Huaranguay	<i>Tecoma stans</i> (L.) Juss. ex Kunth	Sierra	Árbol	4

**Cuadro 2.** Nombre común, hábito y origen de las especies del bosque urbano “Caja de Agua” en Lima (Vásquez *et al.* 2018, Santa Cruz *et al.* 2021, Orellana *et al.* 2023).

Familia	Nombre común	Especie	Origen	Hábito	Nº de individuos
Rosaceae	Nispero	<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl.	Introducida	Árbol	3
Moraceae	Mora	<i>Morus nigra</i> L.	Introducida	Árbol	3
Cycadaceae	Cica	<i>Cycas revoluta</i> Thunb.	Introducida	Palmeto arborescente	2
Euphorbiaceae	San Pedro	<i>Euphorbia candellabrum</i> Welw.	Introducida	Suculenta	2
Moraceae	Higo	<i>Ficus carica</i> L.	Introducida	Árbol	2
Moraceae	Caucho	<i>Ficus elastica</i> Roxb. ex Hornem.	Introducida	Árbol	2
Arecaceae	Palmera fénix	<i>Phoenix canariensis</i> Willdpret	Introducida	Palmera	2
Anacardiaceae	Giruela	<i>Spondias purpurea</i> L.	Introducida	Árbol	2
Annonaceae	Chirimoya	<i>Annona cherimola</i> Mill.	Sierra	Árbol	1
Arecaceae	Palmera roja	<i>Archontophoenix cunninghamiana</i> (H. Wendl.) H. Wendl. & Drude	Introducida	Palmera	1
Fabaceae	Caña fistula	<i>Cassia fistula</i> L.	Introducida	Árbol	1
Meliaceae	Cedro	<i>Cedrela odorata</i> L.	Selva	Árbol	1
Arecaceae	Coco	<i>Cocos nucifera</i> L.	Introducida	Palmera	1
Bignoniaceae	Mata cojudo	<i>Kigelia africana</i> (Lam.) Benth.	Introducida	Árbol	1
Malvaceae	Topa	<i>Ochroma pyramidale</i> (Cav. ex Lam.) Urb.	Selva	Árbol	1
Fabaceae	Azote de Cristo	<i>Parkinsonia aculeata</i> L.	Costa	Árbol	1
Salicaceae	Sauce	<i>Salix humboldtiana</i> Willd.	Sierra	Árbol	1
Sapindaceae	Choloque	<i>Sapindus saponaria</i> L.	Sierra	Árbol	1
Araliaceae	Cheflera	<i>Schefflera actinophylla</i> (Endl.) Harms	Introducida	Árbol	1
Fabaceae	Tipa	<i>Tipuana tipu</i> (Benth.) Kuntze	Introducida	Árbol	1
<b>Número total de individuos</b>					<b>765</b>

**Cuadro 2 (continuación).** Nombre común, hábito y origen de las especies del bosque urbano "Caja de Agua" en Lima (Vásquez et al. 2018, Santa Cruz et al. 2021, Orellana et al. 2023).



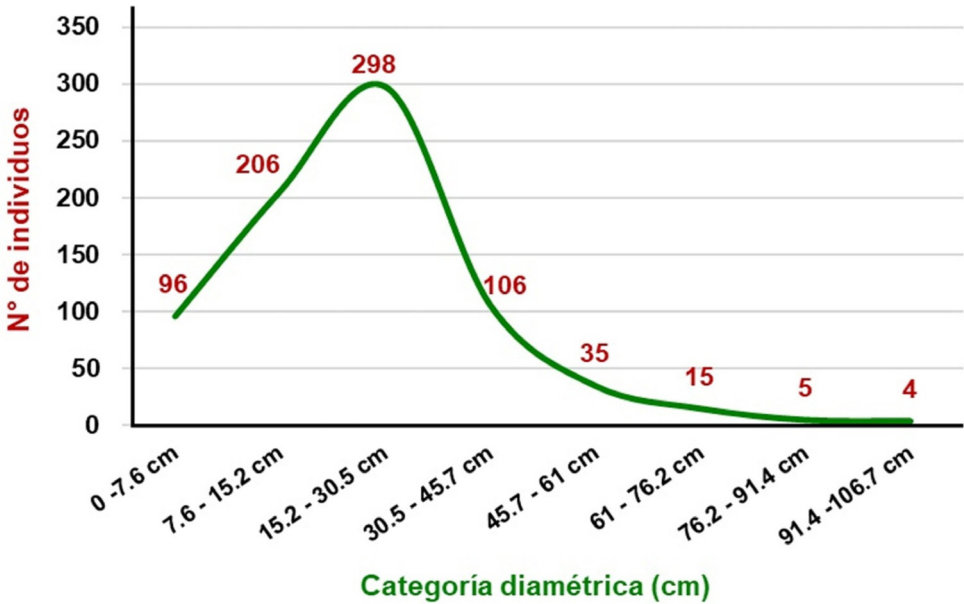


Figura 3. Estructura forestal asimétrica en el bosque urbano “Caja de Agua”, Lima.

*camaldulensis* (25.30%), *Fraxinus americana* (18.70 %), *Ligustrum lucidum* (16.80 %), *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna (9.90 %) y *Melia azedarach* (4.20 %) (Cuadro 3). Por lo tanto, las cinco especies con el mayor índice valor de importancia (VI) fueron *Ligustrum lucidum* (38.60), *Eucalyptus camaldulensis* (33.90), *Fraxinus americana* (30.70), *Ceiba speciosa* (14.70) y *Melia azedarach* (10.20) (Cuadro 3).

**Eliminación de contaminantes del aire**

Con el programa i-Tree Eco se estimó que el bosque urbano “Caja de Agua” eliminó 256.9 kg/año de contaminantes del aire, de los cuales fueron 34.6 kg/año de ozono (O<sub>3</sub>), 31.3 kg/año de monóxido de carbono (CO), 24 kg/año de dióxido de sulfuro (SO<sub>2</sub>), 36.2 kg/año de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), 2 kg/año de material particulado menor a 2.5 micrones (PM<sub>2.5</sub>) y 128.7 kg/año material particulado menor a 10 micrones, pero mayor a 2.5 micrones (PM<sub>10</sub>) (Cuadro 4). Las cinco especies que más contaminantes del aire eliminaron fueron *Eucalyptus camaldulensis* (65.01 kg/año), *Fraxinus americana* (48.15 kg/año), *Ligustrum lucidum*

(43.23 kg/año), *Ceiba speciosa* (25.31 kg/año) y *Melia azedarach* (10.82 kg/año) (Cuadro 4).

**Almacenamiento y captura de carbono**

El almacenamiento de carbono del arbolado del bosque urbano “Caja de Agua” estimado con el uso del programa de i-Tree Eco fue de 172 toneladas métricas. De las 43 especies presentes, *Eucalyptus camaldulensis* fue la que tuvo el mayor almacenamiento de carbono con 49.28 toneladas métricas (28.7 %), seguida de *Ceiba speciosa* con 40.28 toneladas métricas (23.4 %), *Fraxinus americana* con 20.05 toneladas métricas (11.7 %), *Ligustrum lucidum* con 16.15 toneladas métricas (9.4 %) y *Schinus terebinthifolia* con 5.61 toneladas métricas (3.3 %) (Figura 4).

La captura de carbono por parte del arbolado de “Caja de Agua” fue de 16.44 toneladas métricas de carbono por año. Las especies que capturaron la mayor cantidad de carbono al año fueron *Eucalyptus camaldulensis* con 4.93 toneladas métricas/año (30 %), seguida de *Ceiba speciosa* con 2.36 toneladas métricas/año

Nº	Especie	Abundancia relativa (%)	Área foliar relativa (%)	Índice de valor de importancia (VI)
1	<i>Ligustrum lucidum</i>	21.80	16.80	38.60
2	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	8.60	25.30	33.90
3	<i>Fraxinus americana</i>	12.00	18.70	30.70
4	<i>Ceiba speciosa</i>	4.80	9.90	14.70
5	<i>Melia azedarach</i>	6.00	4.20	10.20
6	<i>Ficus benjamina</i>	6.70	3.20	9.90
7	<i>Spathodea campanulata</i>	6.50	3.10	9.60
8	<i>Schinus terebinthifolia</i>	3.90	3.70	7.60
9	<i>Koelreuteria paniculata</i>	3.90	2.40	6.30
10	<i>Dypsis lutescens</i>	5.00	0.30	5.30
11	<i>Musa x paradisiaca</i>	3.10	0.90	4.00
12	<i>Delonix regia</i>	1.40	1.90	3.30
13	<i>Carica papaya</i>	2.60	0.40	3.00
14	<i>Syagrus romanzoffiana</i>	2.20	0.60	2.80
15	<i>Harpullia arborea</i>	0.50	1.40	1.90

**Cuadro 3.** Especies con mayor índice de valor de importancia (IVI) en el bosque urbano “Caja de Agua”, Lima.

Especie	Nº ind.	O <sub>3</sub> (kg/año)	CO (kg/año)	SO <sub>2</sub> (kg/año)	NO <sub>2</sub> (kg/año)	PM <sub>2.5</sub> (kg/año)	PM <sub>10</sub> (kg/año)	Total (kg/año)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	66	8.75	7.93	6.08	9.16	0.51	32.58	65.01
<i>Fraxinus americana</i>	92	6.48	5.87	4.50	6.79	0.38	24.13	48.15
<i>Ligustrum lucidum</i>	167	5.82	5.27	4.04	6.09	0.34	21.66	43.23
<i>Ceiba speciosa</i>	37	3.41	3.09	2.37	3.57	0.20	12.68	25.31
<i>Melia azedarach</i>	46	1.46	1.32	1.01	1.53	0.09	5.42	10.82
<i>Schinus terebinthifolia</i>	30	1.28	1.16	0.89	1.34	0.07	4.76	9.50
<i>Ficus benjamina</i>	51	1.09	0.99	0.76	1.15	0.06	4.07	8.13
<i>Spathodea campanulata</i>	50	1.09	0.98	0.75	1.14	0.06	4.04	8.07
<i>Koelreuteria paniculata</i>	30	0.84	0.76	0.58	0.88	0.05	3.13	6.24
<i>Delonix regia</i>	11	0.67	0.61	0.47	0.71	0.04	2.51	5.01
<i>Harpullia arborea</i>	4	0.47	0.43	0.33	0.49	0.03	1.75	3.49
<i>Morus nigra</i>	3	0.42	0.38	0.29	0.44	0.02	1.55	3.10
Resto de especies	178	2.81	2.54	1.95	2.94	0.16	10.44	20.83
<b>Total (kg/año)</b>		<b>34.6</b>	<b>31.3</b>	<b>24.0</b>	<b>36.2</b>	<b>2.0</b>	<b>128.7</b>	<b>256.9</b>

**Cuadro 4.** Especies que eliminaron la mayor cantidad de contaminantes del aire (kg/año) en el bosque urbano “Caja de Agua”, Lima. O<sub>3</sub> (ozono), CO (monóxido de carbono), SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre), NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrógeno), PM<sub>2.5</sub> (material particulado menor a 2.5 micrones) y PM<sub>10</sub> (material particulado menor a 10 micrones y mayor a 2.5 micrones).

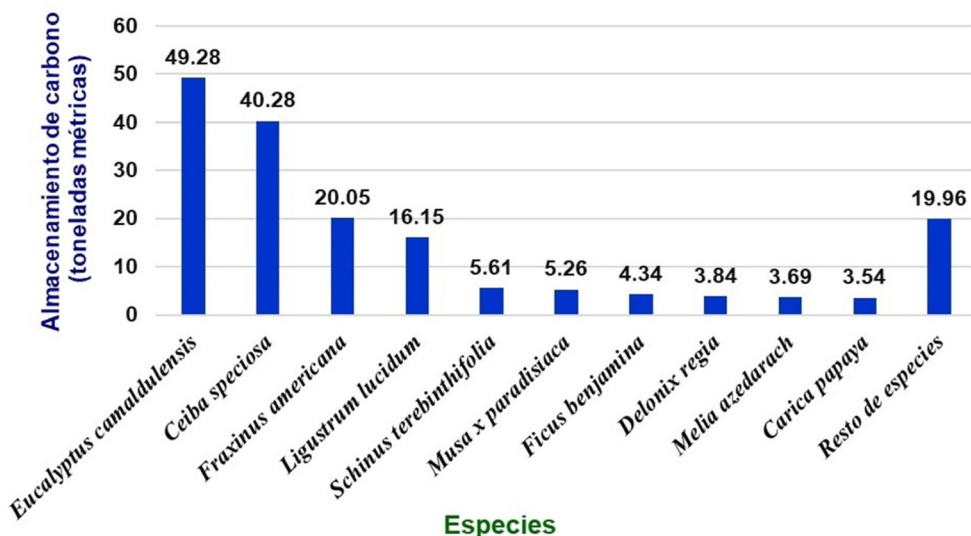


Figura 4. Especies con el mayor almacenamiento de carbono (toneladas métricas) en el bosque urbano “Caja de Agua”, Lima.

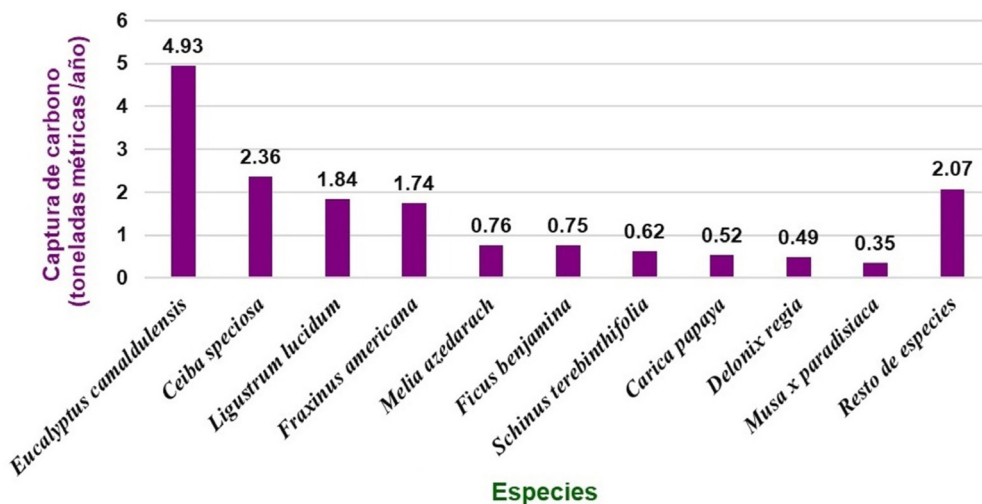


Figura 5. Especies que presentaron la mayor captura de carbono (toneladas métricas/año) en el bosque urbano “Caja de Agua”, Lima.

(14.3%), *Ligustrum lucidum* con 1.84 toneladas métricas/año (11.2%), *Fraxinus americana* con 1.74 toneladas métricas/año (10.6%) y *Melia azedarach* con 0.76 toneladas métricas/año (4.6%) (Figura 5).

### Producción de oxígeno

El arbolado de “Caja de Agua” (765 individuos) produjo un total de 43.83 toneladas métricas de oxígeno al año. Las especies con la mayor producción de oxígeno al año fueron

*Eucalyptus camaldulensis* con 13.16 toneladas métricas/año (30 %), seguida de *Ceiba speciosa* con 6.29 toneladas métricas/año (14.3 %), *Ligustrum lucidum* con 4.91 toneladas métricas/año (11.2 %), *Fraxinus americana* con 4.64 toneladas métricas/año (10.6 %) y *Melia azedarach* con 2.02 toneladas métricas/año (4.6 %) (Figura 6).

**Variación temporal de los tipos de cobertura**

El área del bosque urbano “Caja de Agua” abarca una extensión de 3.06 hectáreas y se encuentra delimitada por viviendas contiguas. Mediante la clasificación de coberturas realizada con el programa i-Tree Canopy usando imágenes satelitales del 2010, se determinó que para ese año la cobertura arbórea/arbustiva era de 2.69 ha (88 %), el suelo desnudo era 0.29 ha (9.5 %), las construcciones abarcaban 0.08 ha (2.5 %) y no se registraron valores para la cobertura herbácea. En cambio, al realizar a evaluación con imágenes del año 2024, se determinó que en ese año la cobertura arbórea/arbustiva fue de 2.04 ha (66.7 %), la vegetación herbácea fue de 0.29 ha (9.5 %), el suelo desnudo fue de 0.65 ha (21.3 %) y las construcciones fueron de 0.08 ha (2.5 %) (Cuadro 5).

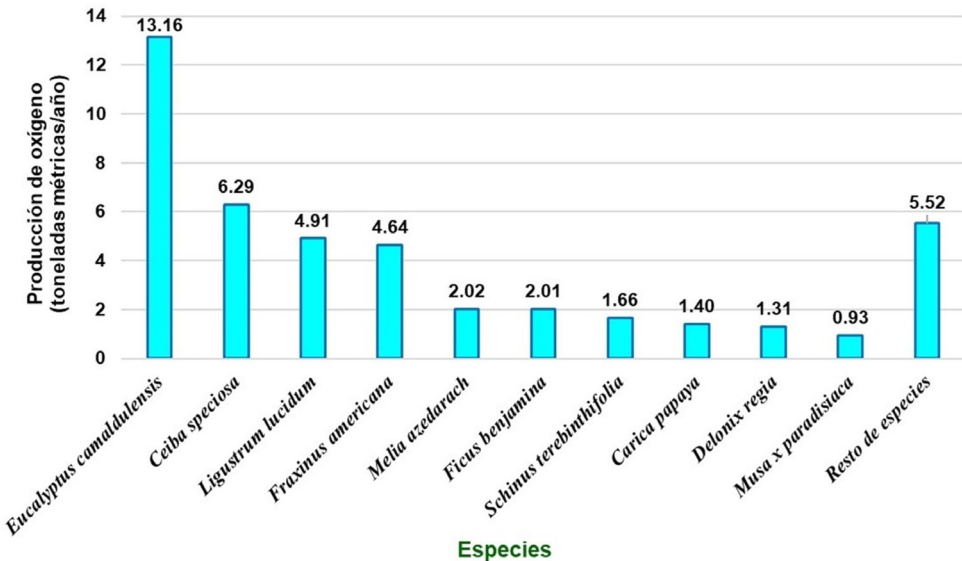
**Valor económico del almacenamiento de carbono en el bosque urbano “Caja de Agua”**

El precio de la tonelada de carbono se calculó en \$ 26.31 dolares. Como el bosque urbano “Caja de Agua” almacenó 172 toneladas métricas de carbono, el valor económico del almacenamiento de carbono se estimó en S/. 17 100 soles, equivalentes a \$ 4 525.32 dólares a una tasa de cambio de \$ 1 = S/. 3.78.

**Discusión**

**Sobre la diversidad y abundancia**

Las especies *Ligustrum lucidum*, *Fraxinus americana*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Ficus benjamina* y *Spathodea campanulata* fueron las cinco más abundantes en el bosque urbano “Caja de Agua”. Estas especies, introducidas en la ciudad de Lima en diferentes áreas verdes (Bulnes *et al.* 2017, Orellana *et al.* 2023), reflejan una tendencia a plantar especies exóticas en la ciudad. Por ejemplo, *Fraxinus americana*, *Ficus benjamina* y *Spathodea campanulata* se han reportado con importantes niveles de abundancia en el distrito de San Borja (Lima) (Machuca 2021). En el censo forestal del distri-



**Figura 6.** Especies con la mayor producción de oxígeno (toneladas métricas/año) en el bosque urbano “Caja de Agua”, Lima.

Cobertura en “Caja de Agua”	Año 2010	Año 2024	Variación temporal	Interpretación
Arbórea/arbustiva	2.69 ha (88%)	2.04 ha (66.7%)	0.65 ha (-21.3%)	Se ha perdido 0.65 ha de cobertura arbórea/arbustiva
Herbácea	0 ha (0%)	0.29 ha (9.5%)	0.29 ha (+9.5%)	Hubo un aumento de 9.5% de cobertura herbácea (césped para cancha deportiva)
Suelo desnudo	0.29 ha (9.5%)	0.65 ha (21.3%)	0.36 ha (+11.8%)	Hubo un aumento del 11.8% del suelo desnudo.
Construcciones	0.08 ha (2.5%)	0.08 ha (2.5%)	0 ha (0%)	No hubo variación
Total	3.06 ha (100%)	3.06 ha (100%)	Balance: 0 ha	No hubo variación en el área total

**Cuadro 5.** Cambios en la cobertura del bosque urbano “Caja de Agua”, Lima.

to de La Victoria (Lima), *Ficus benjamina* fue la especie con la mayor abundancia con 5 633 individuos y *Spathodea campanulata* reportó 660 individuos (Castañeda 2021). Además, *Ligustrum lucidum* y *Fraxinus americana*, son dos especies abundantes en parques de Lima en los distritos de Surco (Salazar 2000) y Lince (Pajar y Velasquez 2023).

El índice de Shannon-Wiener es muy usado en ecología para medir la diversidad en diferentes bosques naturales (Antón y Reynel 2004, Dueñas y Garate 2018), también se aplica para medir la diversidad en parques urbanos. Por ejemplo, el arbolado urbano del Municipio Barcelona (España) tiene un valor de 3.3 (Orellana 2022), mientras que parques de México registran valores de 3.89 (Martínez-Trinidad *et al.* 2021) y el arbolado urbano de Puebla (México) un valor bajo de Shannon-Wiener igual a 1.8, debido principalmente a su baja diversidad de especies (Hernández-Castán *et al.* 2022). El bosque urbano “Caja de Agua” obtuvo un índice de diversidad de Shannon-Wiener (calculado para este estudio en base 2) de 4.06, lo que indicaría una importante diversidad para este bosque urbano, necesitaría para ser conservada, sobre todo para el distrito de San Juan de Lurigancho (Lima).

El bosque urbano “Caja de Agua” con una extensión de 3.06 ha presentó una población

total de 765 individuos arbóreos, teniendo una densidad promedio alta de 250 individuos/ha. En México, se ha reportado una densidad promedio de 167 árboles/ha en parques del Estado de México (Martínez-Trinidad *et al.* 2021) y de 295 árboles/ha en un área verde urbana de Chapultepec (Benavides-Meza y Fernández-Grandizo, 2012). En Lima (Perú) es importante que se tenga un mayor conocimiento sobre el hábito de crecimiento de las especies forestales, para lograr la mejor densidad de plantación en las diferentes áreas verdes de la capital (Quispe 2017). “Caja de Agua”, al ser un lugar donde existe una alta concentración y diversidad de especies forestales, lo convierte en un bosque urbano único para la ciudad de Lima, en especial para el distrito de San Juan de Lurigancho, el de mayor población de la provincia de Lima, con más de un millón de habitantes (Lima Cómo Vamos 2022). Es importante mencionar que la protección de los bosques urbanos en las ciudades es señalada en los dos principales acuerdos mundiales sobre la conservación de la naturaleza, como lo son la Agenda 2030 y el Acuerdo de París por el Cambio Climático (Orellana 2022), por lo que Lima Metropolitana, una ciudad con 2 973 ha de áreas verdes (Lima Cómo Vamos 2022), necesita de la protección y manejo eficiente de su arbolado urbano (riego, campañas de sensibilización para la población, poda de árboles,

manejo y control fitosanitario y plantar más árboles). Siendo el bosque urbano “Caja de Agua” es un lugar prioritario para la conservación, por su diversidad de especies, abundancia de individuos y densidad arbórea.

### Sobre la estructura horizontal del arbolado

El bosque urbano “Caja de Agua” destaca por presentar a la mayoría de su población dentro de categorías diamétricas bajas. El 78.4 % se ubica en las categorías de 0 a 7.6 cm (12.5 %), de 7.6 a 15.2 cm (26.9 %) y de 15.2 a 30.5 cm (39 %), en cambio solo el 3.1 % de la población está en las categorías que van de 61 cm a más de 100 cm, por lo tanto, presentó una estructura horizontal del tipo Asimétrica positiva (Figura 3). Este tipo de estructura es típica de bosques jóvenes, además esta asimetría podría disminuir con la edad o permanecer constante.

En el bosque urbano “Caja de Agua” la densidad de la plantación de los árboles es alta (250 individuos/ha), lo que podría haber influido en diámetros bajos de gran parte de los individuos arbóreos, sobre todo en los lugares donde se han plantado los árboles muy juntos. Por ejemplo, *Ligustrum lucidum* y *Fraxinus americana* (con 67 y 54 individuos respectivamente) presentaron la mayor población en las categorías diamétricas de 0 a 7.6 cm y de 7.6 a 15.2 cm, habiendo zonas donde los individuos de ambas especies crecen muy cerca y presentan bajos diámetros, posiblemente asociado a la falta de luz en las copas, lo que dificulta el engrosamiento de los fustes (Wightman *et al.* 2006). En general, *Fraxinus americana*, *Ligustrum lucidum*, *Dyopsis lutescens*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Ficus benjamina*, *Melia azedarach*, *Schinus terebinthifolia*, *Spathodea campanulata* y *Koelreuteria paniculata* presentaron la mayor parte de su población en las categorías diamétricas más bajas (de 0 a 7.6 cm y de 7.6 a 15.2 cm), por lo que vienen a ser especies importantes en el mantenimiento de la población de “Caja de Agua”. Solo hay 24 individuos por encima de los 60 cm de diámetro (3.1 %), de los cuales 10 son *Eucalyptus camaldulensis*, seis son *Fraxinus americana*, cinco son *Ceiba speciosa*, dos son la palmera *Phoenix canariensis*, y una es *Cedrela odorata*. Estos altos valores se

asocian a la madurez de los individuos y a las características dasométricas de estas especies de presentar diámetros grandes. Se exhibe una alta densidad de plantación de árboles por unidad de área (250 individuos/ha), que es uno de los principios que sigue el método de Akira Miyawaki para un crecimiento vertical más rápido y formación de un dosel cerrado (Ávalos 2022).

### Sobre el índice de valor de importancia (IVI) de las especies

*Ligustrum lucidum*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Fraxinus americana*, *Ceiba speciosa* y *Melia azedarach* fueron las cinco especies con el mayor índice de valor de importancia (IVI) obtenido con el programa i-Tree Eco (Cuadro 3). El índice de valor de importancia (IVI) de las especies indica su dominancia en la estructura del bosque urbano (González-Hernández *et al.* 2023), teniendo estas especies los valores más altos en abundancia y área foliar. *Eucalyptus camaldulensis* presentó el segundo mayor IVI (33.90) en “Caja de Agua” y se ha reportado con el mayor IVI (102.8) en sistemas forestales periurbanos en México (González-Hernández *et al.* 2023), a pesar de ser una especie introducida, sigue plantándose en diversas zonas de Lima (Castañeda 2021, Orellana *et al.* 2023).

### Sobre la eliminación de contaminantes del aire

El arbolado de “Caja de Agua” eliminó 256.9 kg/año de los contaminantes del aire CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> al depositarse estos gases sobre la superficie de las hojas de los árboles. Otras investigaciones que aplicaron i-Tree Eco en Latinoamérica calcularon los contaminantes que eliminaron otros bosques urbanos, en parques de Querétaro (México) fueron 57.06 kg/año (López-Moyao y Rosillo-Pantoja 2021), en parques de Puebla (México) fueron 324 kg/año (Hernández-Castán *et al.* 2023) y el arbolado de Fontibón (Bogotá, Colombia) eliminó 300 kg/año (Martínez-Sánchez y Vanegas-Casas 2021).

Los árboles en las ciudades son importantes porque ayudan a eliminar partículas en suspensión, compuestos orgánicos volátiles y otros agentes formados por pequeñas cantidades de

metales, polen y polvo (Ortiz 2020). El monóxido de carbono (CO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) provienen principalmente del parque automotor (Benites-Morales y Pacsi-Valdivia 2023), siendo importante el arbolado urbano para disminuir estos contaminantes, además del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) (Tovar-Corzo 2006). Además, la ciudad de Lima presenta altos niveles de contaminación, con valores de material particulado PM<sub>2.5</sub> en el aire por encima de la norma que exige el Perú (20 ug/m<sup>3</sup>) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) (10 ug/m<sup>3</sup>), siendo la ciudad con mayor contaminación del aire por PM<sub>2.5</sub> en América Latina con 38 ug/m<sup>3</sup> (Gonzales y Steenland 2014). Por ello, se debe considerar que las plantas en general sean resistentes a la contaminación y que sus hojas presenten mecanismos de defensa, siendo necesario el manejo y conservación del arbolado urbano, ya que la sanidad del arbolado afecta su capacidad de proporcionar beneficios ambientales (Arroyave-Maya *et al.* 2019).

### Sobre el almacenamiento y la captura de carbono

Se estimó el almacenamiento de carbono del bosque urbano "Caja de Agua" en 172 toneladas métricas, un valor alto en comparación con otros bosques urbanos. Por ejemplo, 67.24 toneladas de carbono almacenadas por los 391 individuos arbóreos en cuatro parques de Texcoco, México (Martínez-Trinidad *et al.* 2021) y 13.04 toneladas de carbono en cuatro bosques urbanos de Puebla (México) con 276 árboles (González-Hernández *et al.* 2023). Este almacenamiento de carbono se debe principalmente a la elevada abundancia de individuos (765) y la alta densidad (250 individuos/ha). Además, el bosque urbano "Caja de Agua" presentó en promedio 56.2 t/ha de carbono almacenado, un valor similar al reportado en parques de Lima norte (Perú) con 72.89 t/ha de carbono (Arévalo-Gómez y Alcántara-Boza 2021) y por encima del reportado en parques de Texcoco (México) con 28.85 t/ha de carbono (Martínez-Trinidad *et al.* 2021).

Las especies con mayor almacenamiento de carbono fueron *Eucalyptus camaldulensis*,

*Ceiba speciosa*, *Fraxinus americana*, *Ligustrum lucidum* y *Schinus terebinthifolia* (Figura 4). A pesar de que *Eucalyptus camaldulensis* fue la tercera especie más abundante (66 individuos), tuvo el mayor almacenamiento de carbono por encima de *Ligustrum lucidum* (167 individuos) y *Fraxinus americana* (92 individuos) debido principalmente a sus altos valores en altura total (m) y DAP (cm), presentando mayor biomasa aérea y consecuentemente, mayor carbono almacenado. Otro estudio ha reportado que una especie del género *Eucalyptus* (*Eucalyptus globulus* Labill.) almacenó la mayor cantidad de carbono en la Av. Separadora Industrial en Lima, ubicado a 14 km de "Caja de Agua" (Baca 2017), siendo los eucaliptos especies importantes en términos de almacenamiento de carbono.

En "Caja de Agua", la captura de carbono fue de 16.44 toneladas métricas/año, valor por encima a los reportados en parques de México con 2.56 toneladas métricas/año (Martínez-Trinidad *et al.* 2021) y 0.69 toneladas métricas/año (González-Hernández *et al.* 2023), pero por debajo de las 28.47 toneladas métricas/año en otros bosques urbanos de México (Hernández-Castán *et al.* 2023). Aunque la densidad y abundancia de árboles son los factores más influyentes en el almacenamiento y captura de carbono en parques urbanos, cada especie forestal tiene características únicas que contribuyen de manera colectiva a la captura de carbono (González-Hernández *et al.* 2023).

Las especies que capturaron la mayor cantidad de carbono al año fueron *Eucalyptus camaldulensis*, *Ceiba speciosa*, *Ligustrum lucidum*, *Fraxinus americana* y *Melia azedarach* (Figura 5). Es importante mencionar que la densidad (250 individuos/ha) y el buen estado de conservación del arbolado de "Caja de Agua" ayudó a la captura y almacenamiento de carbono, ya que una cobertura deficiente y una vegetación en mal estado, junto con un clima desértico (como el caso de Lima), puede generar que se obtengan valores muy bajos de captación de dióxido de carbono (Arévalo-Gómez y Alcántara-Boza 2021).

## Sobre la producción de oxígeno

La producción de oxígeno por parte del arbolado urbano mejora la calidad del aire de las ciudades (Lemus-Urán *et al.* 2014). Se estima que se requieren 30 árboles para compensar el consumo anual de oxígeno de un hombre adulto (Martínez-Trinidad *et al.* 2021). Con el programa i-Tree Eco, se estimó que el bosque urbano “Caja de Agua” (765 individuos) produce 43.83 toneladas métricas de oxígeno al año. En otros estudios que aplicaron i-Tree Eco para bosques urbanos de Latinoamérica, se reportaron en México para el parque Jardines de la Hacienda en Querétaro (208 individuos arbóreos) unas 9.01 toneladas métricas de oxígeno al año (López-Moyao y Rosillo-Pantoja 2021), para parques de Texcoco (391 individuos arbóreos) se produjeron 6 toneladas métricas de oxígeno al año (Martínez-Trinidad *et al.* 2021), el arbolado en un área verde en Puebla de 14 ha con 3 403 individuos con valores de diámetros entre los 15 y 30 cm generaron 75.92 toneladas de oxígeno al año (Hernández-Castán *et al.* 2023). Aunque estos valores son pequeños en términos ambientales debido a la gran cantidad de oxígeno presente en la atmósfera, y que entre el 50 y el 85 % del oxígeno que se libera cada año a la atmósfera es producto de las algas marinas de los océanos (Herrera 2022), el arbolado urbano sigue siendo importante para las ciudades, especialmente debido a los altos niveles de contaminación y a la necesidad de aumentar el número de árboles en las zonas urbanas (Dohm *et al.* 2017).

Las especies que produjeron más oxígeno al año (Figura 6) fueron las mismas que capturaron la mayor cantidad de carbono al año (Figura 5). *Eucalyptus camaldulensis* fue la que más oxígeno generó (13.16 t/año) con 66 individuos, seguida de *Ceiba speciosa* (6.29 t/año) con 37 individuos, por encima del oxígeno generado por la especie más abundante *Ligustrum lucidum* (4.91 t/año) con 167 individuos, esto debido a la mayor biomasa aérea que presentaron los individuos de *Eucalyptus camaldulensis* y *Ceiba speciosa*, la cual está relacionada directamente con la captura de carbono y la producción de oxígeno.

## Análisis de la variación temporal de los tipos de cobertura

Con el programa i-Tree Canopy se determinó el cambio de uso de suelo en el bosque urbano “Caja de Agua” del año 2010 hasta el año 2024, mostrando que, durante los últimos 14 años, este bosque urbano ha sufrido una pérdida significativa de su cobertura arbórea/arbustiva pasando de 2.69 ha (año 2010) a 2.04 ha (año 2024), es decir perdió el 21.3 % del área de árboles y arbustos, equivalente a 0.65 ha. De las cuales, 0.29 ha (9.5 %) han sido reemplazada por vegetación herbácea (cancha de césped) y 0.36 ha (11.8 %) han pasado a ser suelo desnudo (Cuadro 5). Se debe de conservar este bosque urbano evitando que se retiren árboles y se aumente el cambio de uso de suelo a cobertura herbácea (cancha de césped). Se recomienda plantar especies forestales en el lugar donde está la cancha de césped y en el área de suelo desnudo, para recuperar la población arbórea de “Caja de Agua” y siga siendo un área importante que otorgue beneficios ambientales al distrito de San Juan de Lurigancho en la ciudad de Lima.

A pesar de la disminución de árboles en el bosque urbano “Caja de Agua”, el 66.7 % de su área (2.04 ha) presenta cobertura arbórea/arbustiva, lo que indicaría que sigue manteniendo un buen estado de conservación, sobre todo si se compara con otros bosques urbanos. Por ejemplo, en Sudamérica, en bosques urbanos del valle de Aburrá en Colombia, la cobertura arbórea alcanzó un 23% (Arroyave-Maya *et al.* 2019), mientras que, en Europa, en bosques urbanos de Barcelona (España), el grado de cobertura arbórea fue de 25% (Baró *et al.* 2014).

## Consideraciones finales sobre la mitigación y compensación ambiental

En el último inventario de emisiones de fuentes móviles y fijas de Lima y Callao, elaborado por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) en el año 2005, se registró la emisión de 40 281 toneladas/año de SO<sub>2</sub>, 11 414 toneladas/año de CO y 8 778 toneladas/año de PM<sub>10</sub> (DIGESA 2005). En comparación, el bosque urbano “Caja de Agua” removió anualmente 24



kg de SO<sub>2</sub>, 31.3 kg de CO y 128.7 kg de PM<sub>10</sub>. La ciudad de Lima cuenta con 29.7 millones m<sup>2</sup> o 2 972 ha de áreas verdes (Lima Cómo Vamos 2022), las que equivalen a 1 457 veces el área de la cobertura arbórea (2.04 ha) del bosque urbano "Caja de Agua". Esta situación evidencia la escasez de áreas verdes en Lima y la necesidad urgente de implementar estrategias para reducir las emisiones, principalmente provenientes del transporte y la industria. Asimismo, es crucial aumentar la instalación y mantenimiento de áreas verdes en la ciudad para compensar las emisiones contaminantes.

Según la United Nations Environment Programme (2024), el sector construcción y edificaciones generó el 37 % de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero a nivel global en el 2022. Teniendo claro los objetivos del Acuerdo de París, este sector debe reducir sus emisiones en un promedio de 9 % anual hasta el año 2030. En este escenario de descarbonización, surgieron las certificaciones de construcción sostenible internacionales como LEED o EDGE, que verifican principalmente la aplicación de estrategias de ahorro y eficiencia energética e hídrica en edificios. Por ejemplo, el Edificio Corporativo ENGIE en Lima, Perú, obtuvo la certificación LEED Silver (ENGIE 2022) y además compró créditos de carbono a la organización "Bosques Amazónicos", compensando las 205 toneladas de CO<sub>2</sub> que generó en el 2021 y las 836 toneladas de CO<sub>2</sub> en el 2022.

En el Perú, el mercado de créditos de carbono para la compensación de huella de carbono de edificios se enfoca en áreas forestales o naturales de gran magnitud; sin embargo, para ecosistemas urbanos en ciudades, como el caso de "Caja de Agua", aún no ha sido explorado, lo cual debería ponerse en discusión para darle mayor valor a los bosques urbanos en Perú. En el presente estudio se estimó con el programa i-Tree Eco que el arbolado de "Caja de Agua" almacenó 172 toneladas métricas de carbono lo que significó un valor económico de S/. 17 100 (\$ 4 525.32). Actualmente existen iniciativas de créditos de carbono estandarizados de bosques urbanos, como la organización

City Forest Credits (CFC) en Estados Unidos, la cual señala que la escala potencial de los proyectos forestales urbanos es significativa (Cutrone *et al.* 2020).

Por otro lado, existen iniciativas locales en Lima que promueven proyectos de arborización, canalizando la inversión privada como parte de la responsabilidad social empresarial, las cuales están asociadas a la compensación de emisiones, aunque no se tratan propiamente de créditos de carbono. Estos proyectos ya sean estandarizados o no, contribuyen significativamente a la conservación y aumento de bosques urbanos. "Caja de Agua" tiene el potencial para créditos de carbono, sin embargo, requiere un sistema verificable que cumpla ciertos estándares para la compra en un mercado voluntario de carbono.

## Conclusiones

El bosque urbano "Caja de Agua" con 765 individuos arbóreos y arborescentes distribuidos en un área de 3.06 hectáreas, desempeña un papel crucial al ofrecer servicios ambientales significativos como la eliminación de 256.9 kg de contaminantes del aire (CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>), la captura de 16.44 toneladas métricas/año de carbono, el almacenamiento de 172 toneladas métricas de carbono y la producción de oxígeno, en beneficio del distrito de San Juan de Lurigancho (Lima, Perú).

Las especies forestales como *Eucalyptus camaldulensis*, *Fraxinus americana*, *Ligustrum lucidum* y *Ceiba speciosa* destacan por su alta abundancia y área foliar, registrando los mayores valores en eliminación de contaminantes del aire, captura y almacenamiento de carbono, así como en la producción de oxígeno, consolidándose como componentes clave en la estructura y funcionalidad del bosque urbano "Caja de Agua".

A pesar de experimentar una pérdida de cobertura arbórea del 21.3 % (equivalente a 0.65 hectáreas) en un periodo de 14 años, el bosque urbano "Caja de Agua" proporciona servicios ambientales esenciales para la ciudad, siendo

un área significativa para la comunidad local. En ese sentido, es necesario aumentar la cobertura arbórea con la plantación de árboles en los espacios disponibles del bosque urbano "Caja de Agua", como en el área de suelo desnudo que abarca el 21.3 % y en el área de cobertura herbácea que representa el 9.5 % del total. Además, se debe evitar el cambio de uso de suelo para asegurar la conservación de este bosque urbano.

### Agradecimientos

Los autores agradecemos al equipo técnico conformado por Darwin Zamora, Félix Bautista, Verónica Meza y Marjhoret Santi, a los miembros del Círculo de Investigación del Ámbito Forestal (CICAF) de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), a Hans Samamé (UNALM), a la ONG Ficus Perú Desarrollo Socioambiental, a la Comunidad Interdisciplinaria para el Desarrollo Sostenible (CIDES) de la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Artes de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), al Instituto de Investigación de la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Artes (INIFAU) de la UNI y a Fabiola Núñez del Programa de Bosques Urbanos de México.

### Contribución de los autores

RH: conceptualización y escritura del documento, trabajo de campo y gabinete, análisis de datos. JG: conceptualización y escritura del documento, análisis de datos. AC: revisión y correcciones del documento, trabajo de campo y gabinete.

### Conflicto de intereses

Los autores no incurrir en conflictos de intereses.

### Fuentes de financiamiento

La etapa de recopilación de datos en campo se realizó con financiamiento del Instituto de Investigación de la Facultad de Arquitectura,

Urbanismo y Artes (INIFAU) de la Universidad Nacional de Ingeniería, bajo el proyecto "Aplicación del i-Tree en el Vivero Forestal Caja de Agua en San Juan de Lurigancho".

### Aspectos éticos / legales

Los autores declaran no haber incurrido en aspectos antiéticos ni haber omitido normas legales.

### ID ORCID

Rosa Huaman

<https://orcid.org/0009-0006-9785-1515>

José Giacomotti

<https://orcid.org/0000-0003-1810-8020>

Arlet Calixto

<https://orcid.org/0009-0006-4811-6637>

### Referencias

Antón, D; Reynel, C. 2004. Relictos de bosques de excepcional diversidad en los Andes centrales de Perú. Lima, Perú, Herbario de la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina. 323 p.

APG (Angiosperm Phylogeny Group). 2016. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. Botanical Journal of the Linnean Society 181(1):1-20. DOI: <https://doi.org/10.1111/boj.12385>.

Arévalo-Gómez, WA; Alcántara-Boza, FA. (2021). Cobertura arbórea y captura de dióxido de carbono en los parques urbanos: Caso: Lima Norte. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas 24(47):13-18. DOI: <https://dx.doi.org/10.15381/iigeo.v24i47.20638>.

Arroyave-Maya, MDP; Posada-Posada, MI; Nowak, DJ; Hoehn, RE. 2019. Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá. Colombia Forestal 22(1):5-16. DOI: <https://doi.org/10.14483/2256201x.13695>.

- Ávalos, MI. 2022. Redefiniendo vacíos urbanos: repensar la habitabilidad a través de estrategias pasivas de diseño microclimático y reacondicionamiento de la vivienda. Tesis de Maestría, Santiago de Chile, Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile. 41 p.
- Baca, J. 2017. Captura de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de especies forestales como mecanismo de compensación ambiental en una vía de alta presión vehicular (Avenida Separadora Industrial) – Lima, 2017. Tesis de Ing. Ambiental, Lima, Perú, Universidad César Vallejo. 106 p.
- Baró, F; Chaparro, L; Gómez-Baggethun, E; Langemeyer, J; Nowak, DJ; Terradas, J. 2014. Contribución de los servicios ecosistémicos a la calidad del aire y las políticas de mitigación del cambio climático: el caso de los bosques urbanos en Barcelona, España. *Ambio* 43(4):466-479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0507-x>.
- Benavides-Meza, HM; Fernández-Grandizo, DY. 2012. Estructura del arbolado y caracterización dasométrica de la segunda sección del Bosque de Chapultepec. *Madera y Bosques* 18(2):51-71.
- Benites-Morales, OF; Pacsi-Valdivia, SA. 2023. Análisis temporal de los contaminantes atmosféricos (NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> troposférico y CO) y su relación con la temperatura del aire y la radiación solar en Lima Metropolitana. *Ecología Aplicada* 22(1):17-25. DOI: <https://doi.org/10.21704/rea.v22i1.850>.
- Benito, G; Palermo-Arce, M. 2021. El árbol en la ciudad: manual de arboricultura urbana. Buenos Aires, Argentina, Editorial Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. 166 p.
- Bulnes, F; Orrego, M; Terán, A. 2017. Árboles y palmeras del vivero forestal. Lima, Perú, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional Agraria La Molina. 166 p.
- Castañeda, D. 2021. Resultados comparativos de dos metodologías empleadas en un inventario de arbolado urbano en la ciudad de Lima. Trabajo de Suficiencia Profesional, Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 50 p.
- Cutrone, C; McPherson, M; Nordman, A. 2020. City Forests: Function, scale, and value of climate and other benefits. Seattle, USA, Urban Forest Carbon Registry and City Forest Credits. 21 p. Disponible en <https://www.cityforestcredits.org/wp-content/uploads/2020/09/CFC-White-Paper-City-Forests-Function-Scale-and-Value-20200906.pdf>.
- DIGESA. 2005. Resultados del inventario de emisiones de fuentes fijas cuenca atmosférica de la ciudad de Lima - Callao. Lima, Perú, Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA). 39 p.
- Dohm, S; Cardich, C; Miranda, L; Carranza-Risco, X. 2017. Guía para elaborar medidas de adaptación al cambio climático para Municipalidades Distritales de Lima Metropolitana. Lima, Perú, Cooperación alemana para el desarrollo. 115 p.
- Dueñas, H; Garate, J. 2018. Diversidad, dominancia y distribución arbórea en Madre de Dios, Perú. *Revista Forestal del Perú* 33(1):4-23. DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/rfp.v33i1.1152>.
- ENGIE. 2022. Reporte Integrado 2022. Lima, Perú. ENGIE Energía Perú. 114 p. Disponible en <https://engie-energia.pe/wp-content/uploads/2023/05/Reporte-Integrado-EEP-2022-D-ENGIE-A-4.pdf>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2017. Directrices para la silvicultura urbana y periurbana. Roma, Italia, FAO 176 p.
- Fernández, R. 2022. Análisis y valoración de los Servicios Ecosistémicos de Regulación del Arbolado de Montes de la ETSI Montes Forestal y del Medio Natural de la Universidad Politécnica de Madrid. Tesis de Maestría, Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid. 78 p.
- Gonzales, GF; Steenland, K. 2014. La salud ambiental en el Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública* 31(2):398-399.
- Gonzales, GF; Zevallos, A; Gonzales-Castañeda, C; Nuñez, D; Gastañaga, C; Cabezas, C; Naeh, L; Levy, K; Steenland, K. 2014. Con-

taminación ambiental, variabilidad climática y cambio climático: una revisión del impacto en la salud de la población peruana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública* 31(3):547-556.

González-Hernández, L; Romo-Lozano, JL; Cristóbal-Acevedo, D; Martínez Damian, MA; Mohedano-Caballero, L. 2023. Valoración económica de los servicios ecosistémicos de cuatro sistemas forestales periurbanos a través de i-Tree Eco. *Madera y Bosques* 29(3): e2932588. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2932588>.

Hammer, Ø; Harper, DAT; Ryan, PD. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1):1-9.

Hernández-Castán, J; Cuesta, E; Ortiz, B; Rosano, E. 2023. Servicios ecosistémicos del arbolado urbano en la Laguna de San Baltazar, Puebla, mediante el uso del software i-Tree. *CIENCIA ergo-sum* 30(2):e198. DOI: <https://doi.org/10.30878/ces.v30n2a5>.

Herrera, A. 2022. Pequeños organismos del mar, nuestro pulmón del planeta. *Revista Peruana de Divulgación Científica en Genética y Biología Molecular* 3(4):41-45.

IQAir. 2024. Calidad de aire en Lima (en línea, sitio web). Consultado 13 mar. 2024. Disponible en <https://www.iqair.com/peru/lima>.

Lemus-Urán, JR; Vélez-Yepes, CA; Zapata-Betancur, NM. 2014. Herramientas del proceso metodológico de valoración del sistema arbóreo urbano componente de los activos ambientales del municipio de Medellín. *Trabajos de Grado Contaduría UdeA* 8(1). Disponible en <https://revistas.udea.edu.co/index.php/tg-contaduria/article/view/27056>.

Lima Cómo Vamos. 2022. ¿Cómo vamos en Lima y Callao? Reporte urbano de indicadores de calidad de vida 2021. Lima, Perú, Sistema Urbano. 65 p.

López-Moyao, CR; Rosillo-Pantoja, I. 2021. Las áreas verdes urbanas y arbolado urbano como impulsores de ciudades sostenibles: Caso de

estudio parque Jardines de la Hacienda. *Digital Ciencia@UAQRO* 14(2):70-83. Disponible en <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/627>.

Machuca, Y. 2021. Plan de manejo del arbolado urbano para la mejora del mantenimiento de las áreas verdes en San Borja, Lima, Perú. Trabajo de Suficiencia Profesional. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 63 p.

Martínez-Sánchez, K; Vanegas-Casas, KS. 2021. Evaluación de los servicios ecosistémicos del arbolado urbano de la localidad de Fontibón mediante i-Tree. Trabajo de Investigación Ing. Forestal, Bogotá, Colombia, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 67 p.

Martínez-Trinidad, T; Hernández López, P; López-López, SF; Mohedano-Caballero, L. 2021. Diversidad, estructura y servicios ecosistémicos del arbolado en cuatro parques de Texcoco mediante i-Tree Eco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(67):202-223. DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i67.880>.

MINAM (Ministerio del Ambiente, Perú). 2019. Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú. Memoria descriptiva. Lima, Perú. Ministerio del Ambiente. 119 p.

Ministerio de Economía y Finanzas. 2021. Nota Técnica para el uso del precio social del carbono en la evaluación social de proyectos de inversión. Ministerio de Economía y Finanzas. 35 p.

Nowak, JD. 2021. Understanding i-Tree: 2021 Summary of Programs and Methods. USDA Forest Service. 100 p.

Orellana, G. 2022. Los servicios ecosistémicos del arbolado urbano: caso de estudio Barcelona. Tesis de Maestría, Barcelona, España, Universidad Politécnica de Catalunya. 67 p.

Orellana, G; Móstiga, M; Bulnes, F; Gamarra, J; Morales, L; Yancce, R. 2023. Un bosque urbano en el desierto: conservación de la biodiversidad en Lima, Perú. *Espacio y Desarrollo* 40:5-35. DOI: <https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.2023.001>.

- Ortiz, F. 2020. Servicios ecosistémicos y gestión del arbolado urbano en Santo Domingo, República Dominicana. Tesis de Maestría en Agroforestería y Agricultura Sostenible, Turrialba, Costa Rica, CATIE. 58 p.
- Pajar, M; Velasquez V. 2023. Valoración económica de áreas verdes y su incidencia en la acumulación de CO<sub>2</sub> en el parque Ramón Castilla, distrito de Lince, 2023. Tesis Ing. Ambiental, Lima, Perú, Universidad César Vallejo. 81 p.
- Quispe, E. 2017. Situación de las Áreas Verdes urbanas en Lima Metropolitana. Trabajo Monográfico Ing. Agrónomo, Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 55 p.
- Salazar, J. 2000. Identificación y caracterización dendrológica de 47 especies de árboles y arbustos cultivados en Santiago de Surco. Tesis Ing. Forestal, Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 368 p.
- Santa Cruz, L; Pintaud, JC; Campos de la Cruz, J; Rodríguez, EF. 2021. Inventario de las palmeras ornamentales cultivadas en Lima Metropolitana, región Lima, Perú. *Arnaldoa* 28(3):531-556. DOI: <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.283.28304>.
- Tovar-Corzo, G. 2006. Manejo del arbolado urbano en Bogotá. *Colombia Forestal* 9(19):187-205.
- United Nations Environment Programme. 2024. Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. Nairobi, Kenya, United Nations Environment Programme. 99 p. Disponible en <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45095>.
- Vásquez, R; Rojas, R; Monteagudo, A; Valenzuela, L; Huamantupa, I. 2018. Catálogo de los árboles del Perú. *Q'EUÑA* 9(1, Número Especial):1-607.
- Wightman, KE; Cornelius, JP; Ugarte-Guerra, LJ. 2006. Manual sobre el establecimiento, manejo y aprovechamiento de plantaciones maderables para productores de la Amazonía Peruana. Lima, Perú, Centro Mundial de Agroforestería (ICRAF). 193 p.