

Catastro de la cobertura arbórea para la planificación urbana

Ricardo García-Paz Soldán

Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma Gabriel René Moreno, Santa Cruz, Bolivia. Email: rdgarciapaz@gmail.com

RESUMEN

En este estudio se determinó la superficie total de la cobertura arbórea (CA) dentro de un distrito urbano y se analizó su configuración espacial. La finalidad fue generar un catastro de la cobertura arbórea como prueba de concepto. El primer objetivo consistió en la clasificación orientada a objetos de una imagen GeoEye1 y la edición a detalle de la capa CA que se obtuvo. Para el análisis de la configuración espacial de la CA se vincularon las tres asignaciones de uso de suelo que se diferencian en la estructura urbana del distrito: espacio privado, espacio público y red vial. Con ello, se logró una evaluación precisa de la superficie que cubrieron las copas de los árboles, su georreferencia, distribución y proporción dentro de la estructura urbana. También permitió una aproximación a los factores que inciden en la situación de la CA. Esta información se constituye en el primer catastro de la CA para un distrito urbano de nuestro país. Inicialmente, la importancia de generar un catastro de la CA es que permitirá a los gobiernos municipales identificar las acciones necesarias para conservar su CA ya existente. A medida que lo integren como marco regulatorio y metodológico podrán identificar prioridades de intervención. Esto significaría un avance cualitativo en la planificación urbana.

Palabras clave: arbolado urbano, clasificación orientada a objetos, configuración espacial, estructura urbana, espacios públicos y privados, red vial

Tree cover cadaster for urban planning

ABSTRACT

This study evaluated the spatial structure of the tree canopy's total surface area (TC) within an urban district. The objective was to produce a proof of concept tree canopy cadastre. The first goal was to classify a GeoEye1 image using objects and then carefully adjust the resulting TC layer. The three land use assignments—private space, public space, and road network—that distinguish the district's urban structure were connected to analyze the TC's spatial arrangement. This made it possible to precisely evaluate the area that TC covered, as well as their georeference, distribution, and percentage inside the urban structure. Additionally, it offered a rough estimate of the variables affecting the TC scenario. This data is the nation's first Urban District Tree Canopy Cadastre registry. First and foremost, creating a Tree Canopy Cadastre is crucial because it helps local governments determine what steps need to be taken to preserve their current TC. They will be able to establish the order of importance for interventions when they incorporate it into their methodological and regulatory framework. This would be a significant development in the field of urban planning.

Key words: object-oriented classification, public and private spaces, road network, spatial configuration, urban trees.

INTRODUCCIÓN

Independientemente del número de árboles que contiene una ciudad, su efecto puede evaluarse por la superficie de cobertura arbórea (CA) que generan (Dwyer y Miller 1999, Kurbán y Cúnsulo 2017). Para este estudio, la CA es el área en m² que tiene la copa de un árbol, arbusto o palmera (biotipo arbóreo) vista desde arriba, sin hacer una diferenciación entre ellos. En publicaciones en inglés se utiliza la sigla UTC (Urban Tree Canopy). El porcentaje de CA que cubren en conjunto permite cuantificar su capacidad para remover CO₂ de la atmósfera y liberar oxígeno, utilizándose como un indicador de calidad ambiental (Rowntree y Nowak 1991, Nowak y Heiler 2010). La CA también incide en la regulación del clima local, estando relacionada con la reducción del efecto de islas de calor y el confort térmico, con un claro beneficio para la población (McPherson et al. 1994, Oke 2004).

Otro aspecto significativo es su importancia en la conservación y recuperación de la biodiversidad, asumida como indicador de desarrollo sostenible a escala urbana (Cordero et al. 2015, Barron et al. 2016). Las CA próximas entre sí y distribuidas proporcionalmente tienen un impacto positivo para la flora y fauna, siendo mucho más favorables cuando estos fragmentos de CA abarcan una mayor superficie (Loram et al. 2008, Beninde et al. 2015). La agregación y conectividad de la CA significa una posibilidad para la formación de bosques urbanos (McPherson et al. 1997, Akinnifesi et al. 2010), estrategia que se plantea como mecanismo de mitigación y adaptación al cambio climático (Pramova et al. 2012).

Sin embargo, la expansión y cohesión de la CA puede verse limitada por el suelo disponible, tanto en espacios privados (Epr) como en espacios públicos (Epu), al igual que las condiciones que se les brinde para su desarrollo (Kendall 2020). Es necesario establecer una red interconectada en toda la estructura urbana (Benedict y McMahon 2012), con espacio suficiente para albergar especies arbóreas, puesto que los servicios ecosistémicos que brinda el arbolado urbano están directamente relacionados con el tamaño de su copa (Maco y McPherson 2003).

El registro árbol por árbol es importante para conocer la estructura y composición de especies, pero solo se aplica para muestreos, aun así, es bastante demandante en cuanto a tiempo y personal. Tampoco permite generar una representación visual y están limitados a Epu (Stark 2011). Los mapas de CA obtenidos a través de la teledetección remota se han constituido en la mejor opción, tanto por la rapidez para generarlos como por el reducido personal que se requiere. La accesibilidad a imágenes satelitales de alta resolución junto con el desarrollo de algoritmos para su clasificación semiautomática ha permitido simplificar muchos de los procesos y mejorar la precisión de los mapas de CA (Hwang y Wiseman 2020).

Un mapa de CA generado mediante teledetección remota es una métrica que puede evaluarse, monitorearse y actualizarse (Parmehr et al. 2016, Barron et al. 2016). Integrada a la información georreferenciada de la estructura urbana, brinda una evaluación precisa sobre su distribución y proporción dentro de Epr y Epu (Stark 2011, Locke et al. 2013). Esto resulta muy útil para identificar áreas que requieran arborizarse, cuantificar la superficie de suelo disponible para arborizar y estimar el número de árboles (McGee et al. 2012). También ofrece la posibilidad de

profundizar en objetivos tales como; identificar el lugar de plantación óptimo y el área disponible (Bodnaruk et al. 2016, USDA 2019b).

En Bolivia, estas líneas de investigación aún no se han desarrollado dentro de los instrumentos de gestión pública. El año 2016 se promulgo la Ley N° 777 del Sistema de Planificación Integral del Estado (SPIE), que integra los procesos de planificación en todos los niveles gubernativos. Si bien los nuevos Planes Territoriales de Desarrollo Integral (PTDI) incorporan en sus lineamientos el enfoque de zonas de vida y cambio climático, se plantean únicamente para un escenario rural. Los gobiernos autónomos municipales, facultados por ley (Ley 777 2016), tampoco han formulado un plan de gestión que les permita generar este tipo de información a escala urbana. La funcionalidad ecológica del diseño urbano, la biodiversidad que alberga y los servicios ecosistémicos del arbolado continúan prácticamente inexplorados.

En ese sentido, la finalidad de este estudio fue desarrollar una metodología para crear un catastro de cobertura arbórea (CA) como prueba de concepto, que permita exponer su funcionalidad como instrumento de gestión en la planificación urbana.

MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio fue el distrito urbano El Carmen (D3), jurisdicción del municipio de La Guardia, en el departamento de Santa Cruz, Bolivia, sobre una altitud entre los 411 a 450 msnm (Cuadro 1, Figura 1). El D3 limita al oeste con el distrito urbano Nueva Esperanza (D4) y al sur con el Parque Regional Lomas de Arena, ambos también corresponden a la jurisdicción del municipio de La Guardia. Con el municipio de Santa Cruz de la Sierra (MSCS) colinda al norte y al este (Gobierno Autónomo Municipal de la Guardia (GAMLG 2010).

Cuadro 1. Datos demográficos distrito urbano El Carmen (D3)

Área de estudio	Población estimada	Superficie ha	Densidad hab./ha
D3 El Carmen	16.830*	3.419 **	5

-Proyección para el año 2012 (PMOT 2010) *

-No es un dato oficial, el municipio de La Guardia maneja otra superficie**

La temperatura media anual en el D3 es de 23,8 °C, con temperaturas menores en los meses de junio y julio, que bajan a los 20 °C. La precipitación media anual es de 1.208 mm, con intervalos mensuales máximos cercanos a los 190 mm, 43 mm como mínimo, y una media de 100,21 mm (Figura 2a).

Biogeográficamente, el D3 forma parte de la provincia del Cerrado, en el sector biogeográfico de Santa Cruz, dentro de los distritos biogeográficos de las Llanuras de Santa Cruz. En el D3 se identifican cinco unidades de vegetación (Figura 2b) **1)** b6: vegetación ribereña sucesional de aguas blancas, **2)** c1e+c9e+c17+c18:

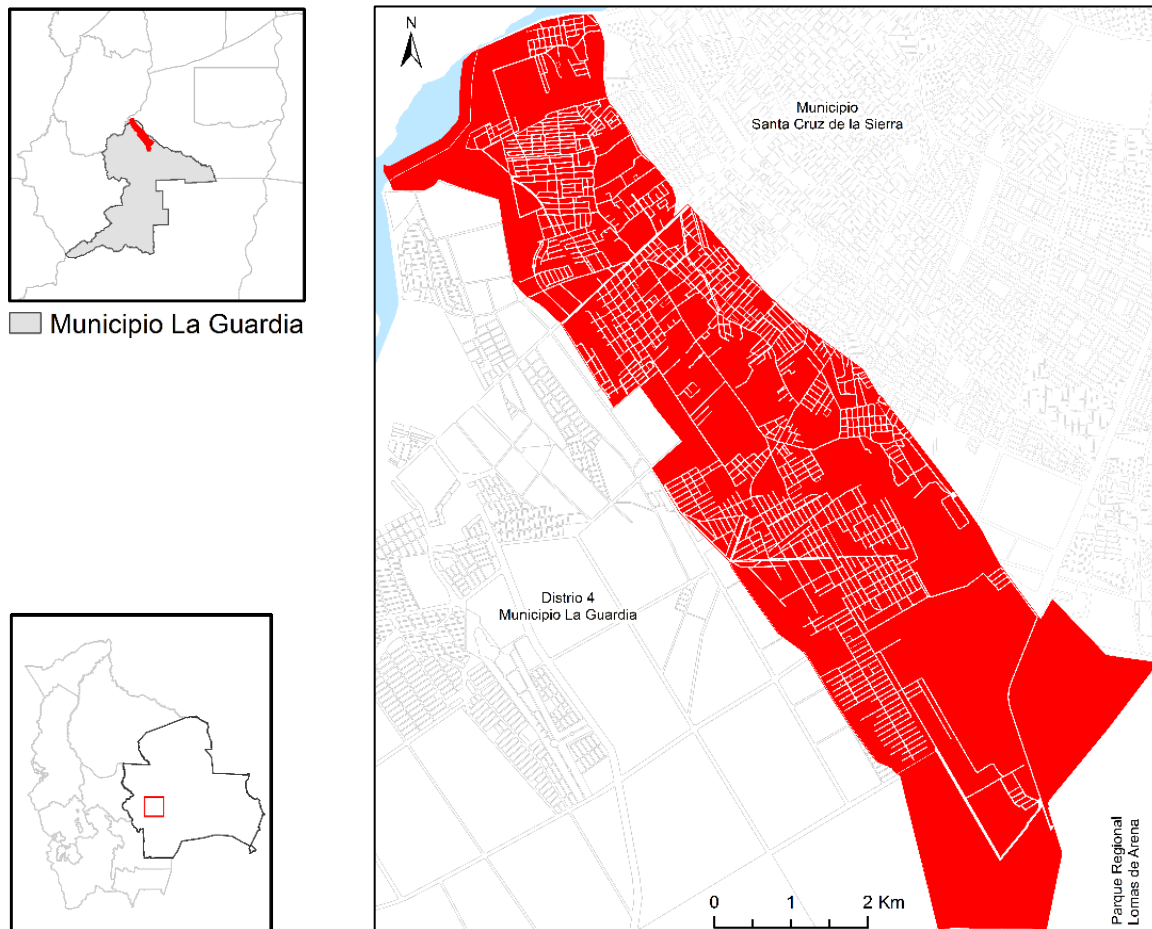


Figura 1. Distrito urbano El Carmen (D3), jurisdicción del municipio La Guardia, en el departamento de Santa Cruz, Bolivia. Elaborado en base a los archivos OpenStreetMap (2015).

vegetación acuática y palustre neotropical, **3)** c17+c1e: sabanas herbáceas oligotróficas higrofiticas, **4)** ca+c9e: bosque semideciduo mesofítico y freatofítico de la chiquitania aluvio-eólica y **5)** ca+c1e+c9e: bosque semideciduo chiquitano sobre arenales de la llanura aluvio-eólica de Santa Cruz (Navarro 2002, Navarro y Ferreira 2007).

Datos de entrada

Se utilizó una imagen multiespectral compuesta por cuatro bandas: rojo, verde, azul e infrarrojo cercano, con una resolución espacial de 1,65 m el pixel, generada por el sensor GeoEye1, el 13/01/13. La corrección radiométrica de la imagen y asignación de sus coordenadas proyectadas (UTM, Datum WGS 84, zona de huso 20S) correspondiente a la ubicación espacial, fueron realizadas por Geosystems Bolivia (proveedor de imágenes satelitales). Para obtener la estructura urbana del D3, se utilizó la base de datos de los archivos OpenStreetMap (OSM 2015) y el Plano director (2012), georreferenciados y convertidos a formato shp.

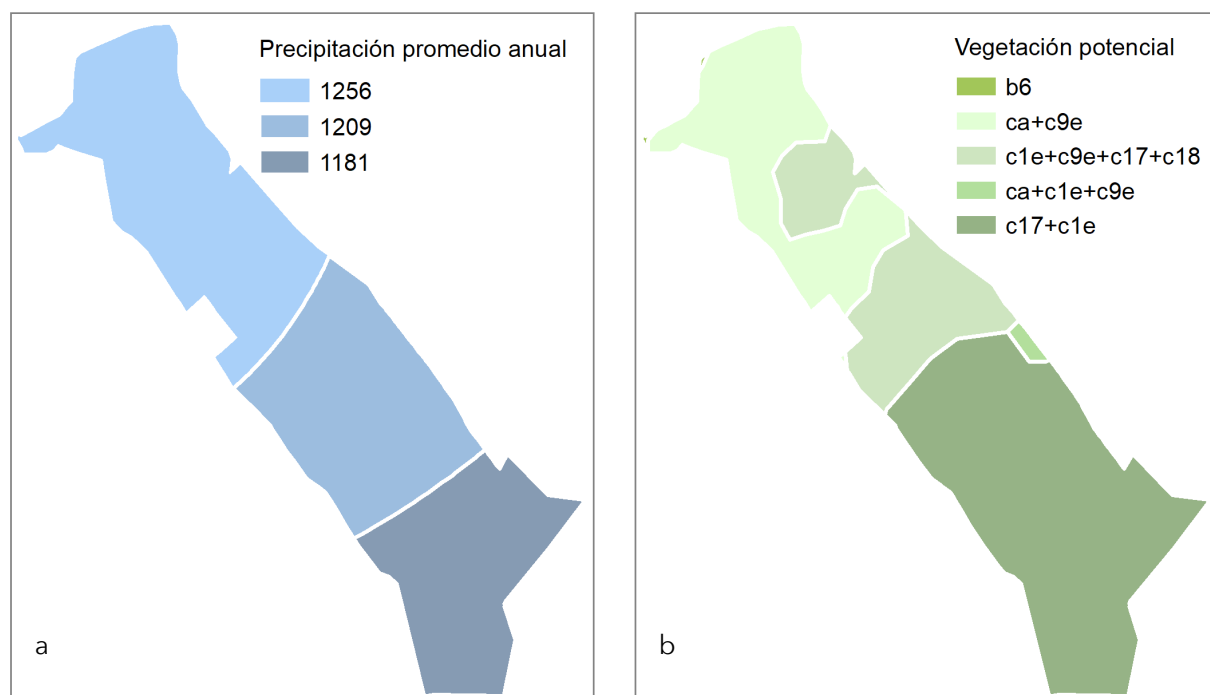


Figura 2. a) precipitación promedio anual, a partir de la base de datos Worldclim, versión 2 (1970-2000). b) vegetación potencial, Navarro y Ferreira (2007).

Obtención de la cobertura arbórea en el D3

Se realizó la clasificación orientada a objetos, considerada como la mejor opción para la clasificación de imágenes satelitales, en comparación con métodos tradicionales (Conde et al. 2009, Perea et al. 2009, Rodríguez 2011). El elemento de análisis fue el biotipo arbóreo (árbol-arbusto-palmera), determinándose la superficie de cada una de sus copas dentro del D3, ya fuese que estuvieran en solitario o agrupados formando parches de bosque.

El proceso se ejecutó con el software ENVI 5.0, que tiene dentro de su caja de herramientas el módulo *Feature Extraction - Exemplar Based*. Su interfaz permite realizar una clasificación orientada a objetos a través de pasos secuenciales, descritos en ENVI (2015). Los pasos fueron: i) Segmentación de la imagen GeoEye1, que depende de la asignación de valores a los algoritmos *Edge* y *Merge*. ii) Selección de áreas de entrenamiento para las clases cobertura arbórea y otras. iii) Aplicación por defecto de los atributos espacial, espectral y textural, aconsejable para áreas extensas (ENVI 2012). iv) Selección del algoritmo de clasificación; para este estudio se optó por *Support Vector Machine* (SVM), que ha demostrado mayor precisión en comparación con otros clasificadores (Ferreiro et al. 2007, Suarez 2014). Del ráster de salida, la clase cobertura arbórea (CA) se convirtió a formato vectorial de tipo polígono.

La validación de la clasificación se centró en la observación visual y edición digital a detalle de la capa vectorial, que corresponde a una evaluación cualitativa (Mas y Couturier 2008). Para ello se utilizó la Imagen GeoEye1 y una grilla conformada por cuadrículas de 500 x 500 metros (25 ha), que facilitó la edición cuadro por cuadro. La resolución espacial de la imagen permitió trabajar a

una escala para edición de 1:1.000, actividad que demandó cerca de 60 horas. En promedio editar 450 ha requería 8 horas. El resultado es un mapa de CA bastante preciso, conformado por polígonos $\geq 6 \text{ m}^2$.

Configuración espacial

Esto requirió generar la estructura urbana del D3 utilizando los archivos OSM (2015), puesto que su Plano director presentaba diferencias en su trazado, respecto a la configuración de la imagen. Se organizó la estructura urbana en tres capas poligonales: espacios privados, espacios públicos y red vial, que hacen una referencia simplificada a la asignación del uso de suelo en el D3. Cada asignación se subdividió en categorías.

Asignaciones de uso de suelo:

1) Espacio privado (Epr)

Para este estudio, lo componen todos los predios amanzanados de uso residencial, condominios cerrados, industrial, comercial, mixto u otras tipificaciones que no sean de manejo público. Los manzanos, ya sean proyectos urbanísticos recientes o antiguos se pueden diferenciar claramente, son áreas bien definidas y delimitadas por la red vial, estos manzanos se dividen por lotes.

Los archivos OSM (2015) permitieron diferenciar polígonos relativamente grandes que aún no están delimitados en manzanos, puesto que en el Plano director toda la superficie del D3 se muestra amanzanada. A este tipo predios se los cataloga como rústicos, que valga recalcar, no son predios rurales, porque están dentro de los límites del D3 (GAMLG 2010). En ese sentido, los Epr lo componen dos categorías:

Amanzanados y Rústicos.

2) Espacio público (Epu)

Son todas las áreas de manejo municipal, que tienen como fin ser de utilidad para sus habitantes y se distribuyen a partir de un porcentaje de sesión que el urbanizador debe asignar como Epu, que es del 40% (áreas verdes 7% equipamiento 10% y red vial 23%) (Código de Urbanismo y Obras del Municipio de La Guardia: CUOMLG 2010). Para identificar los manzanos que correspondían a esta asignación de suelo se transfirió la descripción contenida en el Plano director del D3 y los organizamos en las siguientes categorías: **Área verde, Equipamiento y Protección**. Esta última corresponde a un único polígono ubicado en el extremo norte, que bordea la ribera del río Pirai.

Los archivos OSM (2015) también se utilizaron para adicionar la categoría **Jardineras**, que agrupa las jardineras centrales en la red vial, que no estaban incluidas en el Plano director. De ellas, se incorporaron a la categoría los polígonos con un ancho igual o mayor a 1,50 metros, que se planteó como el mínimo necesario para albergar especies arbóreas nativas de porte medio a grande. En el Plano director solo figuraban las jardineras que se encuentran en la carretera Santa Cruz-La Guardia, en su trayecto por el D3.

3) Red vial (Rv)

Los predios/manzanos obtenidos de OSM (2015) se utilizaron para generar los ejes viales, obteniendo la longitud de la Rv dentro del D3. Se creó un búfer de 4 metros, del eje a la línea de verja de cada lado y se estimó la superficie que cubrían. El conjunto de polígonos resultantes se ajustó a la separación entre predios. Esto significa que el ancho de la vía, sea calle o avenida incluye el área de las aceras de ambos lados. Por último, se descartó el área formada por la intersección de la boca calle. La CA en la Rv también corresponde a la CA que sobresalió de los límites de

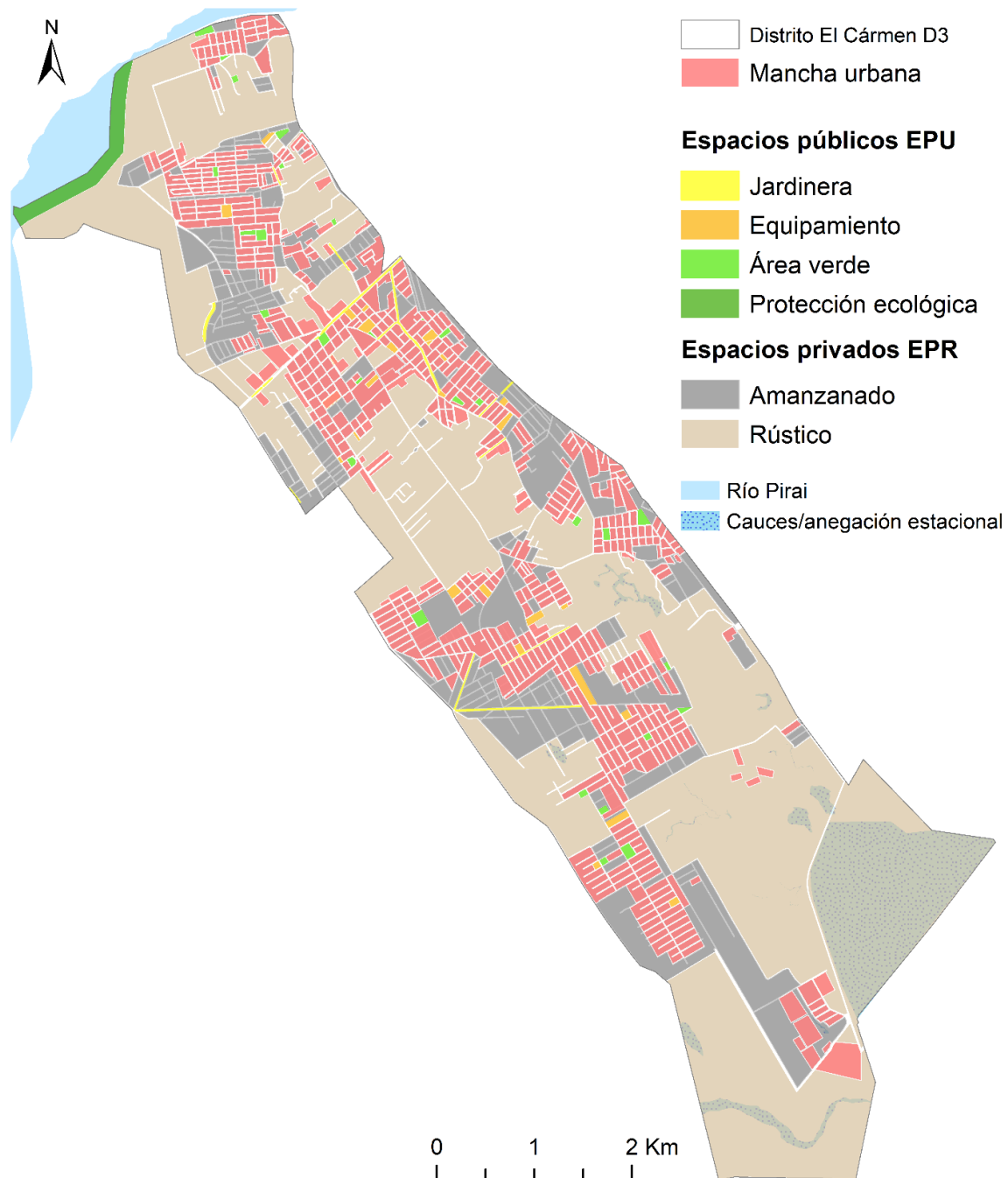


Figura 3. Estructura urbana del D3, elaborada para este estudio usando datos OSM (2015).

Epr, además de la que pueda haber en aceras, debido a que esta metodología no implica la ubicación del fuste.

La Rv tiene como infraestructura de soporte a las aceras que, aunque son de uso público, el propietario decide sobre ellas. Por el contrario, el mantenimiento de las jardineras divisorias en la Rv la gestiona el municipio de La Guardia, de ahí la decisión de presentar las Aceras y Jardineras en distintas asignaciones de uso de suelo.

La CA en manzanos/predios de Epr, Epu y Rv se agruparon en rangos, de acuerdo al porcentaje de CA que contenían en tres divisiones: norte, centro y sur. La zona norte va desde las riberas del río Pirai hasta la carretera Santa Cruz-La Guardia; la zona central corresponde a los primeros asentamientos urbanos, aún con presencia de predios rústicos, y la zona sur, que es la más extensa (Figura 3).

La creación de entidades, la edición de capas, la vinculación de las mismas para determinar la CA en las asignaciones de suelo, como en sus categorías y la preparación de mapas temáticos se trabajaron con en el módulo ArcMap, del Software ArcGIS 10.1 para Desktop.

RESULTADOS

Con la clasificación de la imagen, se generó una base de datos que contenía la delimitación del área de copa de los árboles, su georreferencia espacial y su representación visual (Figura 4).

Cuadro 2. Resumen de la distribución y superficie que cubría la CA total en el D3 el año 2013.

Asignación	Id	Superficie de suelo m ²	CA m ²	Relación CA/ Superficie	Distribución CA	Índices CA
Espacio privado	Epr	31.147,73	3.322,87	10,67%	88,30%	9,78%
Espacio público	Epu	781,75	274,29	35,09%	7,29%	0,81%
Red vial	Rv	2.062,94	165,86	8,04%	4,41%	0,49%
Total general		33.992,42	3.763,02	11,07%	100,00%	11,07%

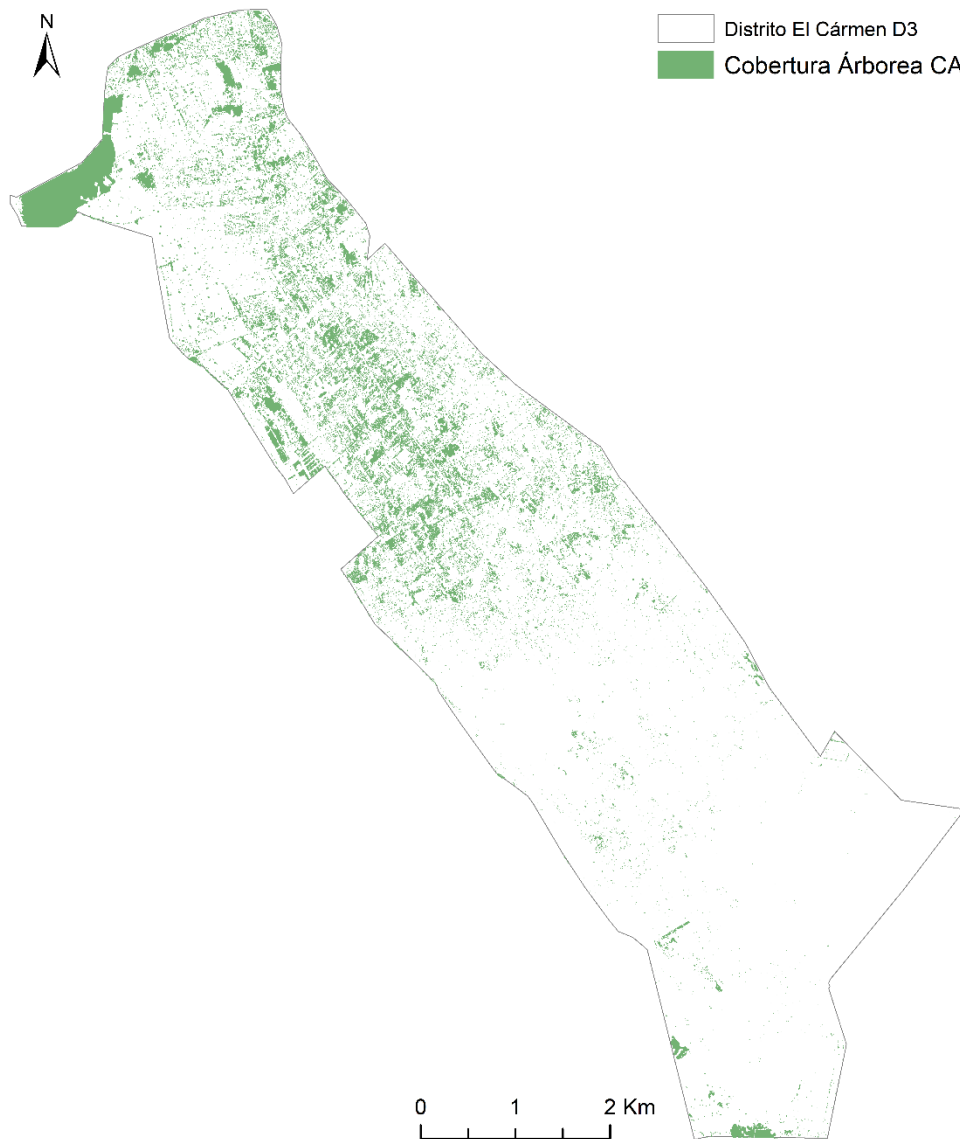


Figura 4. Configuración espacial de la CA en el D3, determinada a partir de una imagen satelital de alta resolución, tomada por el sensor GeoEye1 (el 13/01/2013).

Los atributos sobre su distribución y proporción se obtuvieron vinculando las asignaciones de uso de suelo y las categorías que componen la estructura urbana (Cuadros 2-5, Figura 5 y 6). En conjunto, estos resultados constituyeron lo que en este estudio se cataloga como: catastro de la cobertura arbórea (CA).

El Cuadro 2 muestra el resumen de los resultados de la CA, de acuerdo a las tres asignaciones de suelo que diferenciamos para el D3. La relación representa el porcentaje de CA respecto a la superficie de cada asignación de suelo. La distribución muestra que porcentaje, de la CA total en el D3 se encuentra dentro de cada una. Los índices reflejan su contribución de CA para el D3.

El Cuadro 3 y 4 presentan de forma simplificada la situación de la CA en las categorías que componen las asignaciones de uso de suelo; Espacio privado (Epr) y Espacio público (Epu).

Cuadro 3. CA en Espacios privados (Epr) y las categorías que la componen

Categoría	Conteo	Superficie de suelo m ²	CA m ²	Relación CA/ Superficie	Distribución CA	Índices CA
Amanzanados	666	11.927,77	1.128,46	9,46%	33,96%	3,62%
Rústicos	31	19.219,96	2.194,41	11,42%	66,04%	7,05%

Cuadro 4. CA en Espacios públicos (Epu) y las categorías que la componen

Categoría	Conteo	Superficie de suelo m ²	CA m ²	Relación CA/ Superficie	Distribución CA	Índices CA
Áreas Verdes	31	176,64	26,74	15,14%	9,75%	3,42%
Equipamiento	27	225,34	16,69	7,41%	6,09%	2,14%
A. Protección	1	319,40	227,79	71,32%	83,05%	29,14%
Jardineras	46	60,37	3,07	5,08%	1,12%	0,39%

La Figura 5 muestra la distribución y proporción de la CA en cada uno de los manzanos que componen el D3, tanto Epr como Epu.

Para este estudio cada calle/avenida incluye el área destinada para aceras, de ambos lados. En sí, los resultados para la Rv corresponden a la CA que se encontraba en aceras y/o que se compartía con EPR (Cuadro 5). Esa relación se observa en la Figura 5 y 6, donde los rangos de CA más altos coinciden para las calles y manzanos, al menos en uno de sus lados.

DISCUSIÓN

Existe bastante literatura que describe la metodología que se desarrolló en la clasificación de la imagen, principalmente en ciudades de Estados Unidos y del Reino Unido (Klobucar et al. 2020). Sin embargo, para los análisis suelen manejarse términos ambiguos como "vegetación" y "áreas verdes", incluso se combinan como uno solo con el término "espacios verdes urbanos" (UGS por sus siglas en inglés) [p.e. Li et al. 2021]). Situación similar se da cuando se menciona el indicador de "área verde" por habitante ([p.e. Sorensen et al. 1998, Mena et al. 2011, Pérez y López 2015]). El término "vegetación" es demasiado general y el de "área verde" es solo una tipificación para un uso de suelo. Tampoco queda claro si el indicador "área verde" por habitante se refiere a cualquier uso de suelo con algún biotipo de vegetación.

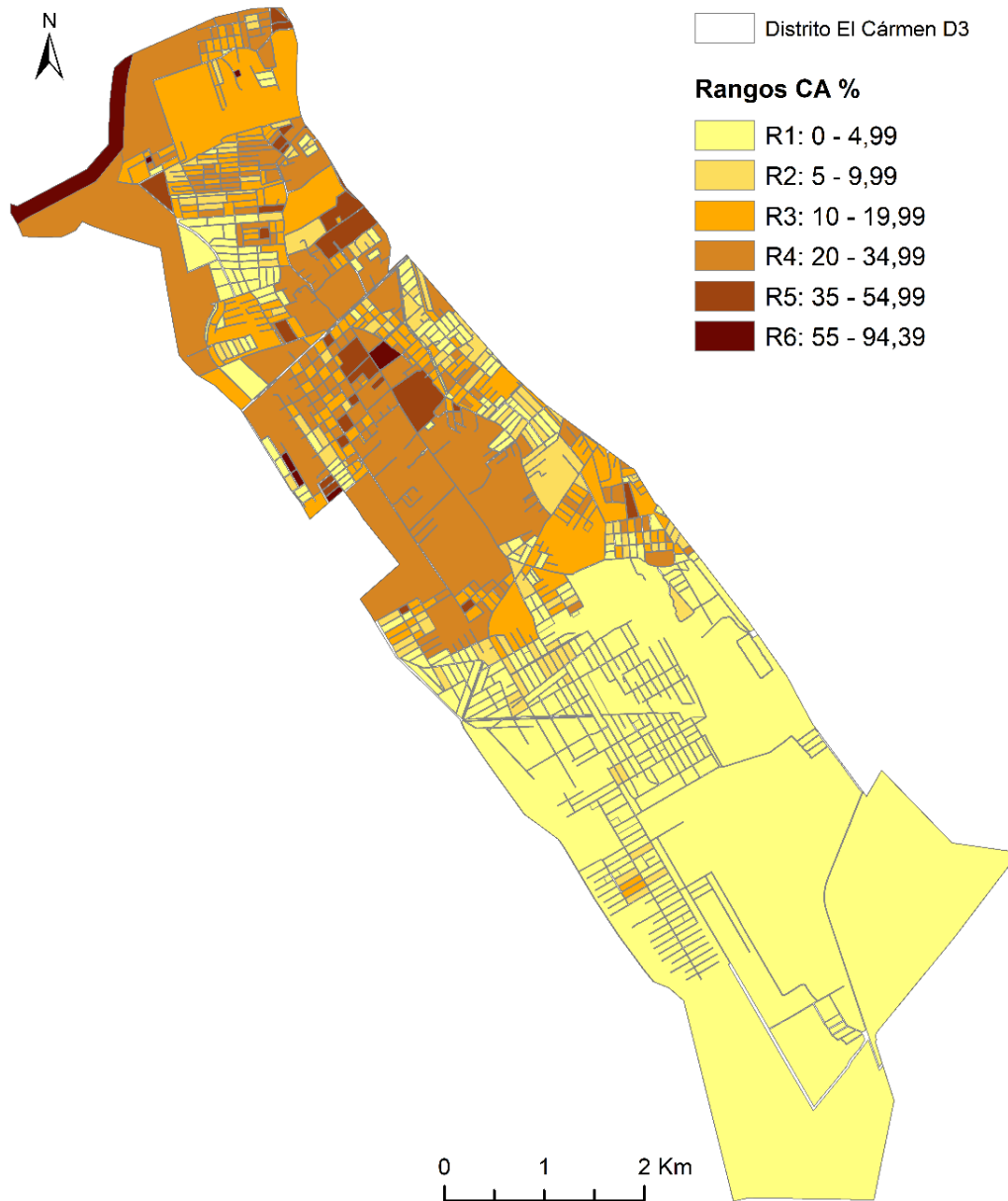


Figura 5. Estructura urbana (Epr y Epu), agrupada en seis rangos de CA. No incluye la Red vial (Rv).

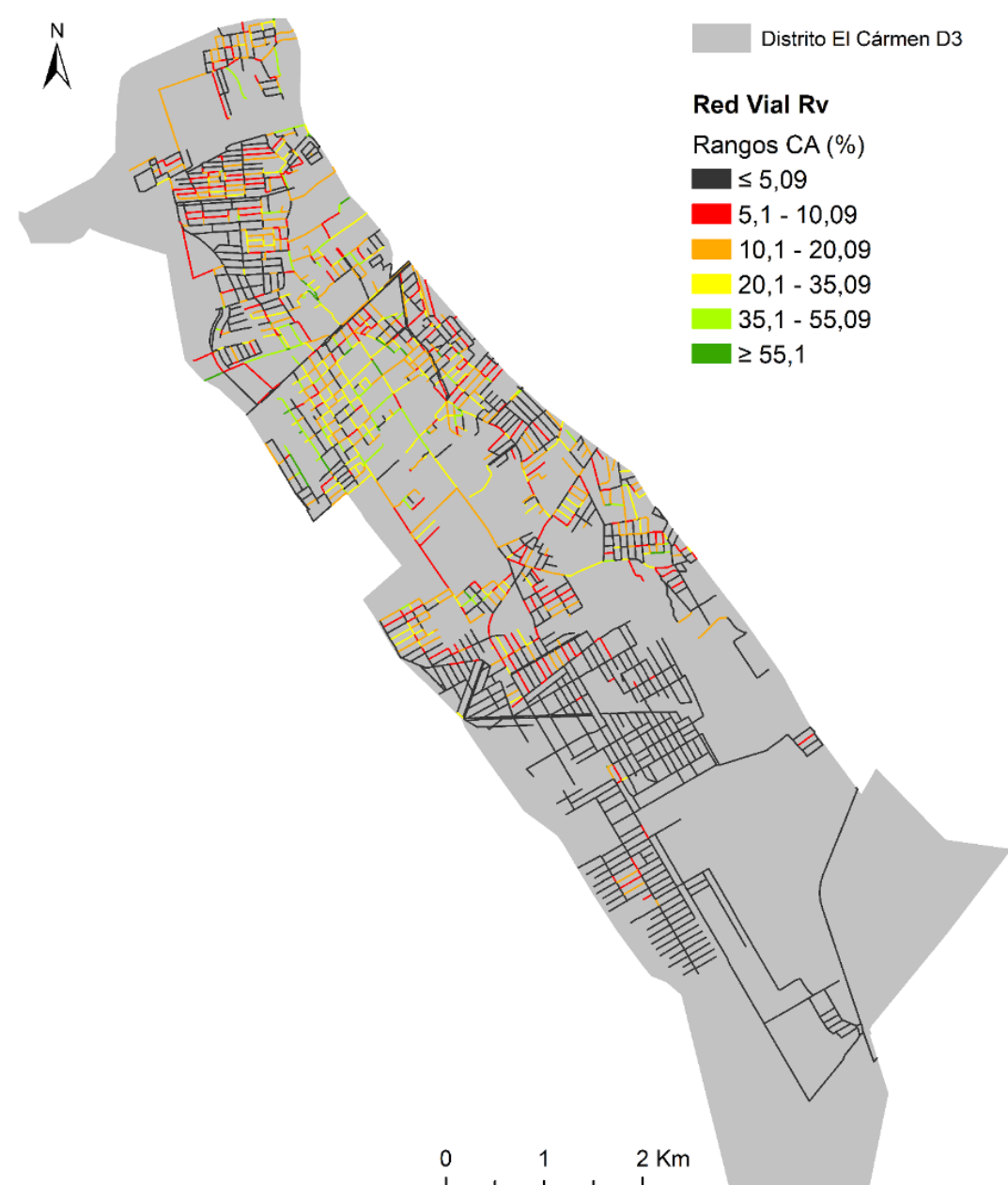


Figura 6. Rangos de CA en la Red vial (Rv) del D3.

Cuadro 5. Red vial (Rv), agrupada en seis rangos de CA

Conteo de calles/ segmentos	Longitud vial (Km)	Superficie de suelo (m ²)	CA (m ²)	Rangos CA (%)	Relación CA/ Superficie (%)	Distribución CA (%)	Índices CA (%)
1.312	153,5	1.224.013	11.885	≤ 5	0,97	7,2	0,6
264	32,2	256.803	18.857	≥ 5,1 - ≤ 10	7,34	11,4	0,9
330	38,9	309.252	43.854	≥ 10,1 - ≤ 20	14,18	26,4	2,1
220	22,2	177.351	46.316	≥ 20,1 - ≤ 35	26,12	27,9	2,2
93	9,5	75.728	31.755	≥ 35,1 - ≤ 55	41,93	19,1	1,5
30	2,5	19.796	13.192	≥ 55,1	66,64	7,9	0,6

Los requerimientos de espacio físico y las funciones ecosistémicas que brinda el biotipo arbóreo difieren al de otro biotipo de vegetación. Además, como se vio en los resultados, la propiedad en la que se encuentran es una variable determinante en las variaciones de CA. En ese sentido, la metodología se concentró en diferenciar claramente el término para el biotipo de estudio (árbol-arbusto-palmera) y de las asignaciones de uso de suelo que componen la estructura urbana (Epr-Epu-Rv). Esto resulta importante a la hora de vincular las capas para su análisis. Las abreviaturas y acrónimos que se introdujeron buscan mantener esa coherencia.

A continuación, se contrastan los resultados de este estudio con investigaciones similares. La situación del D3 no es el foco del análisis y solo se lo utiliza como enlace.

Catastro de la cobertura arbórea

El catastro de la cobertura arbórea (CA) proporciona una evaluación bastante precisa de la superficie que cubren las copas de los árboles, su distribución, proporción y su referencia espacial. Básicamente, es la línea base para el manejo de la biodiversidad en áreas urbanas. Llevado a la práctica, un programa para incrementar la CA bien puede enfocarse en la protección de su CA ya existente, tanto en espacios privados (Epr) como en espacios públicos (Epu-Rv). Los árboles solitarios de gran porte y las formaciones boscosas tienen una mayor capacidad para generar servicios ecosistémicos (Davies et al. 2011). Mientras que las CA de menor tamaño, en muchos casos podrían corresponder a individuos jóvenes y sanos, bien asentados en el terreno. En ambos casos, brindarles las condiciones para su desarrollo representa una gran oportunidad para incrementar la CA en áreas urbanas a corto plazo, en comparación con un proceso de arborización (Hauer y Peterson 2016). A medida que los municipios integren su catastro de CA como marco regulatorio y metodológico, podrán identificar prioridades de intervención.

Configuración espacial de la cobertura arbórea

Salvo excepciones [p.e. Timilsina et al. (2019)], los resultados presentados coinciden con investigaciones similares, que destacan una mayor superficie de CA en espacios privados (Loram et al. 2008, Brennan et al. 2017, Lahoti et al. 2019, Klobucar et al. 2020).

- Epr Amanzanados

En la zona centro, que corresponde a los primeros asentamientos, los manzanos albergaron una CA entre los rangos R3 y R4 (Figura 5), que bien pueden reflejar una transición, tanto en la disminución como en el incremento de la CA. Por una parte, la antigüedad de la vivienda está asociada a una mayor CA (R4 o superior), llegando un punto donde estas son renovadas y la CA que albergan es afectada (R3 o menor) (Steenberg et al. 2018).

La forma en la que se construye la vivienda y el tamaño del lote también inciden en la decisión del propietario para arborizar. Es decir, se ha constatado que lotes pequeños muestran una mayor densidad de área construida, limitando el área disponible para arborizar (Guo et al. 2019). En el caso particular del área de estudio, el tamaño mínimo de los lotes es de 300 m² (10 x 30) (CUOMLG 2010). Teniendo en cuenta que la CA de un árbol de porte medio a grande ocuparía un tercio de esa superficie, construir hacia arriba es una buena alternativa para mantener un área disponible para arborizar.

Existe una alta probabilidad de que al inicio de la ocupación el propietario decida arborizar, probabilidad que disminuye drásticamente después del quinto año (Steenberg et al. 2018, Guo et al. 2019). Sin embargo, el arbolado que llegan a contener en alguna etapa de su urbanización aporta significativamente en el incremento de CA y la biodiversidad en áreas urbanas (Akinifesi et al. 2010, Nielsen et al. 2014). En general, los terrenos de urbanizaciones más recientes se caracterizan por tener una mayor superficie de suelo disponible para arborizar (Biggs et al. 2014). A nivel global solo el uso de suelo residencial abarca cerca del 50% del suelo urbano (ONU 2014).

- Epr Rústicos

La fase en que se encuentran y el patrón de asentamiento en este tipo de propiedades tiene una incidencia directa con la configuración de la CA (Pham et al. 2017) y se infiere que esta situación no es ajena para el D3. Por ejemplo, esta categoría alberga el 66% de la CA para la asignación del uso de suelo y el 58% de la CA total del D3. Tanto las formaciones boscosas de mayor tamaño y la CA que se observa bastante contigua se encuentra dentro de Epr Rústicos. Siendo precisos, el 38% de la CA en el D3 se encuentra en el 15% de su superficie, que corresponde solo al R4. La idea de asignar los Epu y las áreas verdes en particular, antes de que este tipo de propiedades sean urbanizadas (Miller 1997) se ajusta para este escenario. Cabe preguntarse cómo se aplica el Artículo 10.1.1 inciso c del CUOMLG (2010), que: “dispone el desmonte por parte del urbanizador

de todas las áreas de sesión". Con la apertura de la red vial, se presume que es prácticamente un hecho. Sin embargo, queda la interrogante si el proceso de urbanización de estos predios implica el desmonte de la totalidad del área. En ese sentido, el Catastro de la CA brinda el contexto necesario para establecer el marco normativo de nuevos proyectos urbanísticos.

Una situación que se observa es que la CA se distribuye entre la parte norte y centro del D3, mientras que en la parte sur la CA es escasa y dispersa (Figura 4 y 5). Pues bien, la incidencia de las características naturales del emplazamiento sobre la presencia de CA es otro factor limitante (Nowak et al. 1996), que al parecer está bien marcado en la porción sur del D3. Esta porción es catalogada como una zona de sabanas herbáceas oligotróficas higrofitas de la Chiquitania (Figura 2c), que en estado natural se caracterizan por una menor frecuencia de especies arbóreas y arbustivas (Navarro 2002, Navarro y Ferreira 2007). Aquí confluyen arroyos y quebradas provenientes de la parte alta del Distrito 4 (también del municipio de La Guardia), formando cuerpos de agua que pertenecen a la sub cuenca del río Grande, quedando anegada en época de lluvia. Este ecotono requiere una evaluación específica, describirla como un área con escasa CA, como indirectamente se lo hace en este estudio, no es del todo apropiado, puesto que sus características le confieren una cualidad diferente. Se desconoce si actualmente forma parte de una zonificación con algún tipo de restricción para urbanizar y/o si tiene una delimitación. Si así fuese, su área no tendría que incluirse en la determinación de los porcentajes de CA. También queda la interrogante si la CA que alberga está conformada por las pocas especies arbóreas que caracterizan esta zona en estado natural o si diversos factores están induciendo una regeneración con otro tipo de especies.

Las políticas para la gestión del arbolado urbano necesariamente tienen que incluir a los Epr a nivel de propietarios. Ciudades que implementaron ordenanzas catalogando a los árboles de gran porte como prioridad de conservación han constatado el incremento de la CA (Hauer y Peterson 2016, Hilbert et al. 2019). Por otra parte, están los esquemas de compensación, para reemplazar la CA removida, que implica el cálculo de plantines que se requieren como compensación, el espacio físico, el seguimiento y la tasa de supervivencia que se logre (Hilbert et al. 2019). Aun así, recuperar los servicios que brindaba la CA removida llevaría años y hacen que solo sea aplicable en situaciones de riesgo. Para ponerlo en contexto, el secuestro de carbono de los 20 árboles más altos de una ciudad fue 22% superior al de 635 árboles entre 4 a 10 metros de altura (Davies et al. 2011).

En el caso de nuevas urbanizaciones, nuevas edificaciones y renovaciones ¿qué recepción tendría una regulación que establezca un área mínima para arborizar dentro del lote? ¿transgrede el derecho de propiedad? Lo cierto es que los municipios tienen normas de ese tipo, como la que establece un retiro obligatorio de 5 metros de la línea de verja para construir (CUOMLG 2010). Tampoco se trata de más regulaciones, si no de la capacidad de gestión de los gobiernos locales para que se cumplan las ya existentes (Hilbert et al. 2019). Los programas enfocados a informar de los beneficios del arbolado urbanos han mostrado una mayor eficacia que una regulación por si sola (Brunner y Cozens 2013).

- Epu y Rv

Hacer hincapié en la diferenciación de la estructura urbana tiene como fin identificar sobre quién recae la responsabilidad de gestionar el arbolado urbano. La CA y suelo permeable disponible para arborizar en Epu y las categorías que la compongan, depende de la gestión pública (la regeneración natural hace su contribución en el incremento de la CA, siempre que factores naturales y antrópicos no la limiten). La norma de cesión descrita en el Art. 10.6.1 del CUMLG (2010), dispone que los urbanizadores destinen el 17% de la superficie urbanizada para Epu; equipamiento 10%, áreas verdes 7% y el 23% para la Rv, que en conjunto son el 40% del área urbanizada.

Si bien la idea generalizada de arborización se concentra en áreas verdes, también se requiere que las áreas de equipamiento se proyecten con espacio físico suficiente para contener árboles de porte medio a grande (Benedict y McMahon 2012). Cuando se arboriza este tipo de Epu (p.e. hospitales y escuelas), se les confiere multifuncionalidad y se incide positivamente en la conectividad estructural (loja et al. 2014). Para áreas de equipamiento se sugiere un mínimo de 25% de CA (Miller 1997). Con áreas verdes se aplican criterios mucho más selectivos, como el tamaño mínimo del área (Canosa et al. 2003, Tonetti y Nucci 2012), que alberguen un biotipo predominantemente arbóreo y un suelo permeable (Deerksent et al. 2015). Además de los servicios ecosistémicos que genera, la CA que contengan se utiliza como una métrica para ponderar la calidad del Epu, puesto que tienen una correlación positiva en la concurrencia de las personas, indistintamente de la distancia que tengan que recorrer (Li et al. 2021).

En cuanto a la Rv, es la asignación de suelo que abarca la segunda superficie más grande (Tabla 2), aunque el área que se destine para jardineras viales y aceras son realmente la infraestructura de soporte para la CA. Se considera que al no haber generado el área específica para aceras y analizarlas en conjunto con las jardineras viales, es la principal limitación de este estudio. Las aceras (presentadas como única categoría de Rv) son parte del diseño urbano pero su capacidad para contener especies arbóreas está condicionada, mientras que las jardineras viales (manejadas como una categoría dentro de Epu) solo se incluyen para un tipo de vía en particular. Una recomendación es que las nuevas urbanizaciones se proyecten con aceras mucho más anchas (Pham et al. 2017), puesto que el ancho de las aceras está relacionado positivamente con una alta tasa de supervivencia y buen estado fitosanitario del arbolado (Hauer et al. 2020). Para el contexto de este estudio, se considera que la incorporación de jardineras en el diseño vial, indistinto al tipo de vía, significaría un área con mayor potencial para incrementar la CA.

- Jardineras

Siendo de manejo absoluto del municipio, que no es el caso de las aceras, las jardineras divisorias, tienen la ventaja de estar ubicadas en la parte central de la Rv, reduciéndose limitaciones como la del tendido eléctrico y las edificaciones, con la posibilidad de que la copa de los árboles tenga mucho más espacio para extenderse. Esto representa un enorme potencial para contener especies arbóreas, que generan una CA significativamente mayor al área que se les destina. Cuando se evalúa el área disponible para arborizar en estos espacios se subestima el porcentaje de CA que pueden alcanzar (Bodnaruk et al. 2016) [p.e jardineras viales con 2.2 m de ancho para un segmento de calle de 80 m de longitud (son 176 m² de jardinera) pueden contener árboles de porte medio a grande que cubrirían todo el segmento de la calle y sobrepasarían por mucho la superficie destinada. Un ancho total de 3 metros o 1,50 m entre el fuste y el cordón vial

son algunas medidas que se manejan, aunque dependerá de las características de la especie (Hauer et al. 2020), principalmente por el tipo de raíz. Las especies arbóreas que pueden desarrollar una CA extensa, con una copa densa y de hojas perennes, son más efectivas para la retención de contaminantes como para reducir el efecto islas de calor, propios de una Rv. Resulta importante que estas jardineras se diseñen con espacio físico suficiente para contener especies arbóreas con esas características (Bodnaruk et al. 2016, Alonzo et al. 2021). Una CA $\geq 40\%$ cubriendo el segmento de la calle logra un enfriamiento sustancial en la temperatura del aire (Ziter et al. 2019). Estas áreas también ofrecen hábitats para la fauna urbana (Sjöman et al. 2016).

- Aceras

La CA en aceras es afectada por una situación compleja. Si bien el área asignada para aceras es de uso público, es el propietario el que decide sobre ellas (p.e. impermeabilizando, reduciendo el tamaño, arborizando, eliminando parcial o totalmente la CA, ocupándose para comercio o como estacionamiento). Otra situación que no favorece el incremento de la CA en aceras es el tendido eléctrico y del servicio de agua potable, entre otros. También hay que tener en cuenta que las aceras tienen un fin predominantemente peatonal. Se presume que al integrar las capas vectoriales de estos servicios públicos, el área mínima libre para el peatón y la línea de verja de los Epr, la CA que se determina para aceras estaría catalogada como en riesgo de ser eliminada. Ya sea decisión del propietario de la vivienda, de la empresa de servicios públicos o el mismo municipio. Incluso, solo la poda puede significar el deterioro en la condición del árbol, que luego se utiliza para justificar su remoción.

En general, la CA en jardineras viales y las aceras también están expuestas a perturbaciones como la excavación, compactación e impermeabilización del suelo, producida por la construcción de infraestructura pública y privada. Esto afecta al sistema radicular de las especies arbóreas circundantes, siendo condicionantes que inciden negativamente con el estado fitosanitario y la tasa de supervivencia del arbolado urbano (Hauer et al. 2020). De hecho, el no aplicar el criterio de Zona Crítica de Raíz (ZCR) para la infraestructura que se realiza es la principal causa de afectación a la salud del arbolado en Epu (Universidad estatal de Oregón-USDA 2009). Dado que los municipios tienen el control de la infraestructura que planifican para sus Epu, resulta factible incorporar el criterio de ZCR, tanto en el diseño como en la ejecución.

CONCLUSIONES

El catastro de la CA que se presenta es una prueba de concepto, realizado en base a experiencias previas. La metodología plantea una diferenciación clara en el uso de conceptos y de las tipologías de suelo que componen el diseño urbano. Esto resulta importante a la hora de organizarlos para su análisis. Por lo general, las investigaciones que se realizan para determinar la CA se enfocan en el método de clasificación, presentado un mapa de CA únicamente.

Para generar el catastro de la cobertura arbórea (CA) se requiere: 1) determinar la superficie de CA, independiente del método que se utilice (clasificación - detección de objetos) y 2) vincular las distintas capas que componen el diseño urbano. De hecho, mínimamente se necesitan tres capas poligonales: manzanos, red vial y aceras. Cuanto más se desglose cada una de ellas mayor será la

posibilidad de análisis. Si bien para los análisis se trabajó con una caracterización simplificada de estas capas, bastó para exponer la importancia de un catastro de la CA en la planificación urbana. El potencial del catastro de la CA como instrumento de gestión es amplio y su implementación significaría un avance cualitativo para la planificación urbana.

RECOMENDACIONES

Con su catastro de la CA, los municipios deben enfocarse primeramente, en identificar las acciones necesarias para conservar su CA ya existente. A medida que lo integren podrán establecer metas y prioridades de intervención. Por ejemplo: generando el catastro de CA para su radio urbano, los municipios podrán entender de forma rápida y precisa la situación del arbolado a nivel Distrital, por Unidades Vecinales, Manzanos y de cada lote. Esto resulta importante para identificar Epu que requieran arborizarse. Por otra parte están las áreas potenciales para conservar; como corredores ecológicos, ecotonos y biotopos. También se logra estimar el número de árboles, generar índices de CA, métricas del paisaje y cuantificar los servicios ecosistémicos que brinda la CA de cada árbol. Albergando esta información un catastro de la CA se establecería como el Plano director para el manejo de la biodiversidad en áreas urbanas.

El catastro de la CA también permite conocer la capacidad del diseño urbano para albergar especies arbóreas. Esta información es esencial para hacer reajustes a la infraestructura pública, donde necesariamente tiene que aplicarse el criterio de Zona Crítica de Raíz (ZCR).

Las áreas de equipamiento y la red vial bien pueden proyectarse con un enfoque de multifuncionalidad, aumentando el área disponible para arborizar. En el caso de las aceras, cuando los municipios integren su catastro de la CA con las capas del tendido eléctrico y el resto de los servicios públicos, podrán categorizar el grado de conflicto con la CA en aceras. De esta forma podrán identificar aceras inviables para arborizar, que aún no tienen un conflicto con la CA, principalmente con un enfoque preventivo.

También permite entender el potencial de los espacios privados (Epr) en el incremento de la CA de una ciudad. Esto abre la oportunidad de involucrar a los propietarios en el manejo del arbolado urbano, tanto en sus predios como en las aceras. Los municipios pueden llevar a cabo análisis específicos, ya que cuentan con toda su estructura urbana georreferenciada y organizada (deberían).

AGRADECIMIENTOS

A Geosystems Bolivia e Ing. Tatiana Uzin, que brindaron sin condición alguna las imágenes satelitales de alta resolución. Al Jardín Botánico de Missouri y M.Sc. Luzmila Arroyo, sus gestiones permitieron que esta investigación reciba financiamiento económico. Para Jesús Pinto Ph.D.; M.Sc. Hans Argote y M.Sc. Alejandro Araujo-Murakami por las revisiones y sugerencias al contenido del documento.

Aclaración: la catalogación de uso de suelo, las superficies que abarcan y los límites del D3 son únicamente de referencia, creados para este estudio a partir de datos de libre acceso. El autor no tiene ningún interés de evaluar la gestión pública en el D3, que se utilizó como área de estudio dada la disponibilidad de la imagen satelital GeoEye1.

LITERATURA CITADA

- Akinnifesi, F.; Sileshi, G.; Ajayi, O.; Akinnifesi, A.; De Moura, E.; Linhares, J. y Rodrigues, I. 2010. Biodiversity of the urban homegardens of Sao Luís city, Northeastern Brazil. *Urban Ecosystems*, 13, 129-146. <https://www.researchgate.net/publication/275888358>
- Alonzo, M.; Matthew, B. y Yuemeng, G. y Shandas, V. 2021. Spatial configuration and time of day impact the magnitude of urban tree canopy cooling. *Environmental Research Letters*. 16. 10.1088/1748-9326/ac12f2.
- Barron, S.; Sheppard, S.R. y Condon, P.M. 2016. Urban forest indicators for planning and designing future forests. *Forests*, 7(9), 208.
- Benedict, M.A. y McMahon, E.T. 2012. *Green infrastructure: linking landscapes and communities*. Island press.
- Beninde, J.; Veith, M. y Hochkirch, A. 2015. Biodiversity in cities needs space: a meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation. *Ecology letters*, 18(6), 581-592.
- Bigsby, K.M.; McHale, M.R. y Hess, G.R. 2014. Urban Morphology Drives the Homogenization of Tree Cover in Baltimore, MD, and Raleigh, NC. *Ecosystems* 17, 212-227. <https://doi.org/10.1007/s10021-013-9718-4>
- Bodnaruk, E.W.; Kroll, C.N.; Yang, Y.; Hirabayashi, S.; Nowak, D.J. y Endreny, T.A. 2016. Where to plant urban trees? A spatially explicit methodology to explore ecosystem service tradeoffs. *Landscape and Urban Planning*, 157, 457-467.
- Brennan, M.; Mills, G. y Ningal, T. 2017. *Dublin Tree Canopy Study Report*. School of Geography, University College Dublin.
- Brunner, J. y Cozens, P. 2013. 'Where have all the trees gone?' Urban consolidation and the demise of urban vegetation: A case study from Western Australia. *Planning Practice and Research*, 28(2), 231-255.
- Canosa, E.; Sáez, E.; Sanabria, C. y Zavala, I. 2003. Metodología para el estudio de los parques urbanos: la Comunidad de Madrid. *GeoFocus (Artículos)*, 3, 160-185. Disponible en: <https://repositorio.uam.es/handle/10486/665638>
- Conde, C.; Perelman, S. y Cerezo, A. 2009. Efecto de diferentes métodos de clasificación de imágenes satelitales sobre índices de paisaje. *Revista de Teledetección* 32: 5-13. Disponible en: <http://www.aet.org.es/?q=revista32-3>
- Cordero, P.; Vanegas, S. y Hermida, M.A. 2015. La biodiversidad urbana como síntoma de una ciudad sostenible. Estudio de la zona del Yanuncay en Cuenca, Ecuador. *Maskana*, 6(1), 107-130.
- Davies, Z.G.; Edmondson, J.L.; Heinemeyer, A.; Leake, J.R. y Gaston, K.J. 2011. Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale. *Journal of Applied Ecology*, 48: 1125-1134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02021.x>
- Derkzen, M.; van Teeffelen, A. y Verburg, P. 2015. Quantifying urban ecosystem services based on high-resolution data of urban green space: an assessment for Rotterdam, The Netherlands. *Journal of Applied Ecology*: 52, 1020-1032.
- Dwyer, M.C. y Miller, R.W. 1999. Using GIS to assess urban tree canopy benefits and surrounding greenspace distributions. *Journal of Arboriculture*, 25, 102-107.
- ENVI. 2012. Feature Extraction Module. Exelis, official documentation. Disponible en: <http://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/envi/FXExampleBasedTutorial.pdf>

- ENVI. 2015. Feature Extraction, Example-Based Classification. Disponible en: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/Classification.html>
- Ferreiro, M.; Bandeira, L.; Martín, J. y Pina, P. 2007. Clasificadores para vegetación y áreas boscosas con imágenes multiespectrales de baja resolución. *Lecture Notes in Computer Science*, 1, 177-184. Disponible en: <http://Eprints.ucm.es/10259/1/T31475.pdf>
- Gobierno Autónomo Municipal de La Guardia. 2010. Plan municipal de ordenamiento territorial: PMOT 2010-2014. 2010. 260 pág.
- Gobierno Autónomo Municipal de La Guardia. 2010. Código de urbanismo y obras (CUOMLG), primera edición (adaptación técnica). 308 pág.
- Gobierno Autónomo Municipal de La Guardia. 2012. Plano director, distrito urbano El Carmen D3.
- Guo, T.; Morgenroth, J. y Conway, T. 2019. To plant, remove, or retain: understanding property owner decisions about trees during redevelopment. *Landsc. Urban Plan.* 190, 103601
- Hauer, R.J. y Peterson, W.D. 2016. Municipal Tree Care and Management in the United States: A 2014 Urban y Community Forestry Census of Tree Activities. Special Publication 16-1, College of Natural Resources, University of Wisconsin-Stevens Point. 71 pp.
<http://www.uwsp.edu/cnr/Pages/Forestry---MTCUS.aspx>
- Hauer, R.J.; Peterson, W.D.; Wulder, M.A. y Nelson, T.A. 2020. Sidewalk Shade and Street Trees: Evaluating the Use of Google Street View to Assess Their Distribution. *Urban Forestry & Urban Greening*, 54, 126765.
- Hilbert, D.R.; Roman, L.A.; Koeser, A.; Vogt, J. y van Doorn, N.S. 2019. Urban tree mortality: a literature review. *Arboric. Urban For.* 45 (5), 167-200.
- Hwang, W.H. y Wiseman, P. 2020. Geospatial Methods for Tree Canopy Assessment: A Case Study of an Urbanized College Campus. *Arboriculture y Urban Forestry*. 46. 51-65. 10.48044/jauf.2020.005.
- Ioja, C.I.; Grădinaru, S.R.; Onose, D.A.; Vânău, G.O. y Tudor, A.C. 2014. The potential of school green areas to improve urban green connectivity and multifunctionality. *Urban Forestry y Urban Greening*, 13(4), 704-713.
- Kendall, R. 2020. The effects of street tree site planting width on canopy width and ability to provide ecosystem services. *Environmental studies undergraduate student theses*. 267. <https://digitalcommons.unl.edu/envstudtheses/267>
- Klobucar, B.; Östberg, J.; Jansson, M.; Randrup, T.B. 2020. Long-Term Validation and Governance Role in Contemporary Urban Tree Monitoring: A Review. *Sustainability* 2020, 12, 5589. <https://doi.org/10.3390/su12145589>
- Kurbán, A. y Cúnsulo, M. 2017. Confort térmico en espacios verdes urbanos de ambientes áridos. *Revista Hábitat Sustentable* Vol. 7, 1. Disponible en: <https://doi.org/10.22320/07190700.2017.07.01.04>
- Lahoti, S.; Kefi, M.; Lahoti, A. y Saito, O. 2019. Mapping Methodology of Public Urban Green Spaces Using GIS: An Example of Nagpur City, India. *Sustainability*, 11, 2166. <https://doi.org/10.3390/su11072166>
- Ley N° 777 del Sistema de Planificación Integral del Estado – SPIE, 2017
- Li, X.; Huang, Y. y Ma, X. 2021. Evaluation of the accessible urban public green space at the community-scale with the consideration of temporal accessibility and quality, *Ecological Indicators*, Volume 131, 108231, ISSN 1470-160X
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108231>
- Locke, D.H.; Grove, J.M.; Galvin, M.; O'Neil-Dunne, J.P. y Murphy, C. 2013. Applications of urban tree canopy assessment and prioritization tools: Supporting collaborative decision making to

- achieve urban sustainability goals. *Cities and the Environment (CATE)*, 6(1), 7. En: <https://digitalcommons.lmu.edu/cate/vol6/iss1/7/>
- Loram, A.; Thompson, K.; Warren, P. y Gaston, K. 2008. Urban domestic gardens: The richness and composition of the flora in five cities. *Journal of Vegetation Science* 19: 321-330. <http://www.jstor.org/stable/25173203>
- Maco, S.E. y McPherson, E.G. 2003. A practical approach to assessing structure, function, and value of street tree populations in small communities. *J. Arboricult.* 29 (2), 84-97
- Mas, J.F. y Couturier, S. 2008. Evaluación de la fiabilidad temática de bases de datos cartográficas. pp. 675-703. En: Bautista F.; H. Delfín y J. L. Palacio-Prieto (eds.). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología.
- McGee, J.; Day, S.; Wynne, R. y White, B. 2012. Using Geospatial Tools to Assess the Urban Tree Canopy: Decision Support for Local Governments. *Journal of Forestry*, *Journal of Forestry*, 110(5):275-286 (July). DOI: 10.5849/jof.11-052
- McPherson, E.G.; Nowak, D.J. y Rowntree, R. 1994. Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project, General Technical Report No. NE-186, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Radnor, PA. Disponible en: https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_ne186.pdf
- McPherson, E.G.; Nowak, D.J.; Heisler, G.; Grimmond, S.; Souch, C.; Grant, R. y Rowntree, R. 1997. Quantifying urban forest structure function, and value: the Chicago Urban Forest Climate Project. *Urban Ecosyst.* 1, 49-61.
- Mena, C.; Ormazábal, Y.; Morales, Y.; Santelices, R. y Gajardo, J. 2011. Índices de área verde y cobertura vegetal para la ciudad de Parral (Chile), mediante fotointerpretación y SIG. *Revista Ciencia Forestal*, 2(3), 521-531. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53420071012>
- Miller, R.W. 1997. Planeación del enverdecimiento urbano. pp. 83-108. En Krishnamurthy, L. y J. Rente Nascimento (Eds.) *Áreas verdes urbanas en Latinoamérica y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo Washington DC. Disponible en: www.rivasdaniel.com/Pdfs/Areas_verdes_LatAmerica.pdf
- Navarro, G. 2002. Vegetación y unidades biogeográficas de Bolivia. pp. 1-500. En: Navarro, G. y Maldonado, M. (Eds.). *Geografía ecológica de Bolivia. Vegetación y ambientes acuáticos*. Centro de ecología y difusión Simón I. Patiño. Santa Cruz de la Sierra.
- Navarro, G. y Ferreira, W. 2007. Leyenda explicativa de las unidades del mapa de vegetación de Bolivia a escala 1:250.000. Rumbol S.R.L. Cochabamba-Bolivia. 65 pág.
- Nielsen, A.B.; Östberg, J. y Delshamar, T. 2014. Review of Urban Tree Inventory Methods Used to Collect Data at Single-Tree Level. *Arboric. Urban For.* 40, 96-111.
- Nowak, D.J.; Rowntree, R.; McPherson, E.G.; Sisinni, S.; Kerkmann, E. y Stevens, J. 1996. Medición y el análisis de la cubierta de árboles urbanos. *Paisaje y Planificación Urbana*, 36, 49-57. Disponible en: https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/1996/ne_1996_nowak_001.pdf
- Nowak, D.J. y Heisler, G.M. 2010. Improving air quality with trees and parks. *Research Series Monograph*. Ashburn, VA: National Recreation and Parks Association *Research Series Monograph*. 44 p.
- Oke, T.R. 2004. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. IOM Report No. 81, WMO/TD No. 1250, Geneva: World Meteorology Organization <http://www.wmo.ch/web/www/IMOP/publications/IOM-81/IOM-81-UrbanMetObs.pdf>

- ONU. 2014. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights, United Nations (UN), Department of Economic and Social Affairs Population Division: New York, NY, USA.
- OpenStreetMap. 2015. Municipio La Guardia, Provincia Andrés Ibáñez, SCZ, Bolivia. Recuperado de: <https://www.openstreetmap.org/node/794507239#map=11/-17.8918/-63.3303>.
- Oregon Department of Forestry, Washington State Department of Natural Resources, Oregon State University Extension Service, USDA Forest Service Urban and Community Forestry Program, y Pacific Northwest Chapter of the International Society of Arboriculture. 2009. Tree Protection on Construction and Development Sites: A Best Management Practices Guidebook for the Pacific Northwest.
- Parmehr, E.G.; Amati, M.; Taylor, E.J. y Livesley, S.J. 2016. Estimation of urban tree canopy cover using random point sampling and remote sensing methods. *Urban Forestry & Urban Greening* 20: 160-171.
- Perea, A.; Meroño, J. y Aguilera, M. 2009. Clasificación orientada a objetos en fotografías aéreas digitales para la discriminación de usos del suelo. *Revista Interciencia*, 34(9), 612-616. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33913149003>
- Pérez, S. y López, I. 2015. Áreas verdes y arbolado en Mérida, Yucatán. Hacia una sostenibilidad urbana. *Revista economía, sociedad y territorio*, 15(47), 1-33. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11132816002>
- Pham, T.H.; Apparicio, P.; Landry, S.M. y Lewnard, J. 2017. Disentangling the Effects of Urban Form and Socio-Demographic Context on Street Tree Cover: A Multi-Level Analysis from Montréal. *Landscape and Urban Planning*, 157, 422.
- Pramova, E.; Bruno, L.; Djoudi, H. y Somorin, O. 2012. Bosques y árboles para la adaptación social al cambio y la variabilidad del clima. CIFOR. Boletín Brief, 15, 1-16. Disponible en: <http://hal.cirad.fr/cirad-00937160>
- Rodríguez, A. 2011. Metodología para detectar cambios en el uso de la tierra utilizando los principios de clasificación orientada a objetos, estudios de caso piedemonte de Villavicencio, Meta. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Disponible en: <https://bdigital.unal.edu.co/5241/1/andresfeliperodriguezvasquez.2011.pdf>
- Rowntree, R. y Nowak, D.J. 1991. Quantifying the role of urban forests in removing atmospheric carbon dioxide. *Journal Arboriculture*, 17, 269-275. Disponible en: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/18726>
- Sjöman, H.; Morgenroth, J.; Sjöman, J.; Sæbø, A. y Kowarik, I. 2016. Diversification of the urban forest—Can we afford to exclude exotic tree species? *Urban Forestry & Urban Greening*. 18. 10.1016/j.ufug.2016.06.011.
- Sorensen, M.; Barzetti, V.; Keipi, K. y Williams, J. 1998. Manejo de las áreas verdes urbanas. División de Medio Ambiente Departamento de Desarrollo Sostenible Banco Interamericano de Desarrollo Washington, D.C. Disponible en: <https://www.services.iadb.org/wmsfiles/products/Publications/1441394.pdf>
- Stark, K. 2011. Uso de GIS para caracterizar los valores, el cambio de la copa de los árboles urbanos y la propiedad. Un estudio de caso en la ciudad de Winona, MN, EE.UU. Volumen 13, artículos sobre análisis de recursos. 24 páginas. Prensa de servicios centrales universitarios de la Universidad de Saint Mary de Minnesota.
- Steenberg, J.; Robinson, P. y Duinker, P. 2018. A spatio-temporal analysis of the relationship between housing renovation, socioeconomic status, and urban forest ecosystems. *Environment and Planning B Planning and Design*. 46.

- Suarez, A. 2014. Clasificación de imágenes satelitales de alta dimensionalidad. (Tesis de Licenciatura). Universidad Santiago de Compostela, España. 194 pág. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10347/13003>
- Timilsina, S.; Sharma, S.K. y Aryal, J. 2019. Mapping urban trees within cadastral parcels using an object-based convolutional neural network. ISPRS annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 4, 111-117.
- Tonetti, E. y Nucci, J. 2012. Arborização viária na área central de Paranaguá Brasil. Revista Geografar, 7(1), 53-67. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5380/geografar.v7i1.22556>
- USDA. 2019b. Urban tree canopy assessment: a community's path to understanding and managing the urban forest, U.S. Department of Agriculture, Forest Service., pp. 16.
- Ziter, C.D.; Pedersen, E.J.; Kucharik, C.J. y Turner, M.G. 2019. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer Proc. Natl Acad. Sci. USA 116 7575-80. Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.1817561116>