

Análisis multitemporal de la transformación del paisaje y valoración de su incidencia en el servicio ecosistémico de regulación del carbono en la región Bogotá

Multi-temporal analysis of landscape change and assessment of its impact on the ecosystem regulating carbon in the Bogotá region

Julieth Monroy-Hernández ^a

RESUMEN

Los procesos de urbanización generan continuas transformaciones sobre las áreas naturales y rurales que conllevan cambios en el paisaje y sus funciones a diferentes escalas, lo que aumenta la probabilidad de diversos procesos de degradación. Este artículo presenta los resultados del proyecto “Diagnóstico de la transformación del paisaje y valoración de su incidencia en el servicio ecosistémico de regulación de carbono en coberturas vegetales de Bogotá y su región”, el cual se enfocó en el análisis espacial multitemporal de los cambios en la distribución de coberturas y sus posibles efectos en la capacidad de estas para regular el flujo de carbono, a partir de la estimación de la productividad primaria neta como indicador de la captura de carbono y las tendencias de degradación. Con el objetivo de identificar áreas prioritarias para la investigación en el marco de las metas del Jardín Botánico de Bogotá, el proyecto se configura como un diagnóstico que toma un periodo de tiempo de veinte años, comprendido entre 2001 y 2019. El estudio permitió reconocer las áreas donde se han presentado las mayores transformaciones del paisaje regional por la expansión urbana, las cuales se encuentran principalmente en el borde urbano-rural de Bogotá, en los municipios de Funza, Madrid, Mosquera, Cota, Tocancipá y Soacha, y en los alrededores de la represa El Muña en el municipio de Sibaté.

PALABRAS CLAVE: transformación del paisaje, servicios ecosistémicos, flujo del carbono, productividad primaria, degradación de la tierra.

ABSTRACT

The urbanization process is undergoing a continuous transformation of natural and rural areas, leading to changes in the configuration and functions of the landscape at different scales, thus increasing the likelihood of degradation courses. This report shows the results of the project “Diagnosis of landscape transformation and its impact on the ecosystem service of carbon regulation by vegetation cover in Bogotá and its region” centered on the spatial analysis of changes in land cover and their likely effects on carbon flux regulation, estimating net primary productivity as an indicator of carbon sequestration and degradation trends. To identify priority areas for detailed studies, the project proposes a diagnosis covering 20 years between 2001 and 2019. The survey identified the areas where the principal transformations have occurred due to urban expansion, primarily related to the urban-rural border of Bogotá and its municipalities: Funza, Madrid, Mosquera, Cota, Tocancipá and Soacha, and the surroundings of El Muña dam in Sibaté.

KEYWORDS: landscape change, ecosystem services, carbon flux, primary productivity, land degradation.

^a Jardín Botánico de Bogotá, Subdirección Científica, Línea Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos. Bogotá, Colombia. ORCID Monroy-Hernández, J.: <https://orcid.org/0000-0003-1607-6344>; email: juliethmh@gmail.com

Introducción

Las áreas urbanas albergan a más de la mitad de la población mundial y tienen una alta proporción de actividades económicas que generan alrededor de un 60% de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Revi et al., 2014). Otras fuentes de GEI se encuentran en servicios demandados por las ciudades, que se desarrollan fuera de estas, como la agricultura, las actividades pecuarias (como la ganadería), la eliminación de desechos, la generación de energía, el abastecimiento de agua, la minería, entre otros, que generan presión sobre la región adyacente e influyen en procesos como la deforestación y la fragmentación del paisaje (Marcotullio, 2016; United Nations Human Settlements Program, 2011).

De esta forma, la urbanización es un motor de cambio que conforma una red de múltiples escalas, que genera transformaciones sobre el paisaje y aumenta la probabilidad de ocurrencia de fenómenos de degradación (Marcotullio, 2016; Revi et al., 2014). La extensión espacial de las ciudades y su entorno construido pueden tener impactos significativos en el balance ecosistémico local y regional. Al respecto, se han encontrado evidencias de cómo las ciudades pueden influir en la transformación de los paisajes naturales y seminaturales y el clima, como cambios en la temperatura media anual o en los regímenes de lluvia, que causan un incremento en la frecuencia de eventos extremos (por ejemplo, tormentas e inundaciones consecuentes o periodos de sequía más intensos), esto configura complejas retroalimentaciones que son condicionadas por los usos del suelo y las cualidades ambientales (Revi et al., 2014).

Por esto, las ciudades requieren implementar acciones que permitan hacer compatible la sostenibilidad ambiental con el desarrollo económico y urbano. Ejemplos de estas acciones son: reconocer cómo la captación y almacenamiento de carbono aportan a la mitigación del cambio climático o comprender la estructura ecológica regional y los servicios ecosistémicos (SE) relacionados con la regulación de procesos ecológicos, con el fin de priorizar su adecuada gestión (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2014; Revi et al., 2014).

En Bogotá, los procesos de urbanización y la presión sobre sus áreas rurales adyacentes, de las que

se espera una mayor producción de recursos para el sostenimiento de la ciudad, han generado la extensión de áreas agrícolas y de actividades pecuarias, sobre pastizales, arbustales, bosques y páramos. Esto afecta los SE que prestan estas áreas a escalas tanto locales como regionales, principalmente relacionados con la regulación del ciclo del carbono (captura y almacenamiento de carbono tanto en la vegetación como en los suelos) y la regulación hídrica (como la regulación de la escorrentía superficial y la infiltración) (Buytaert et al., 2014; Suárez-Duque et al., 2016).

Con el fin de valorar estos impactos, y en el marco de la meta “Determinar a través de investigaciones el potencial ecológico y valoración del servicio ecosistémico de almacenamiento y flujo de carbono”, el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis se propuso desarrollar un diagnóstico de la transformación del paisaje ocasionado por el crecimiento urbano y la valoración de su incidencia en el servicio ecosistémico de regulación del carbono. El proyecto se planteó como objetivo estimar la productividad primaria neta como indicador de la captura de carbono, observando los cambios en el tiempo para identificar áreas de transformación del paisaje y degradación de la tierra, que puedan ser tomadas como referencia para el desarrollo de investigaciones a mayor detalle en temáticas como: potencialidades de captura y almacenamiento del carbono en coberturas específicas; valoración de alteraciones en la fisiología de las especies; cambios en los patrones de distribución y riqueza de especies; alteraciones en los patrones fenológicos; priorización de áreas de restauración y proyección, y de acciones de manejo integrado del paisaje.

El área de trabajo abarca el territorio de Bogotá D.C. y los municipios adyacentes con los cuales la ciudad ha mantenido una continua relación funcional: La Calera, Sopó, Tocancipá, Gachancipá, Zipaquirá, Cota, Chía, Tenjo, Tabio, Cajicá, Facatativá, Funza, Madrid, El Rosal, Mosquera, Bojacá, Soacha y Sibaté, como se muestra en la Figura 1.

Se considera que estos municipios hacen parte de la aglomeración funcional urbana Bogotá-La Sabana, o Región Bogotá, donde las actividades han desbordado el límite político-administrativo de la ciudad hacia sus municipios aledaños (DNP, 2014).

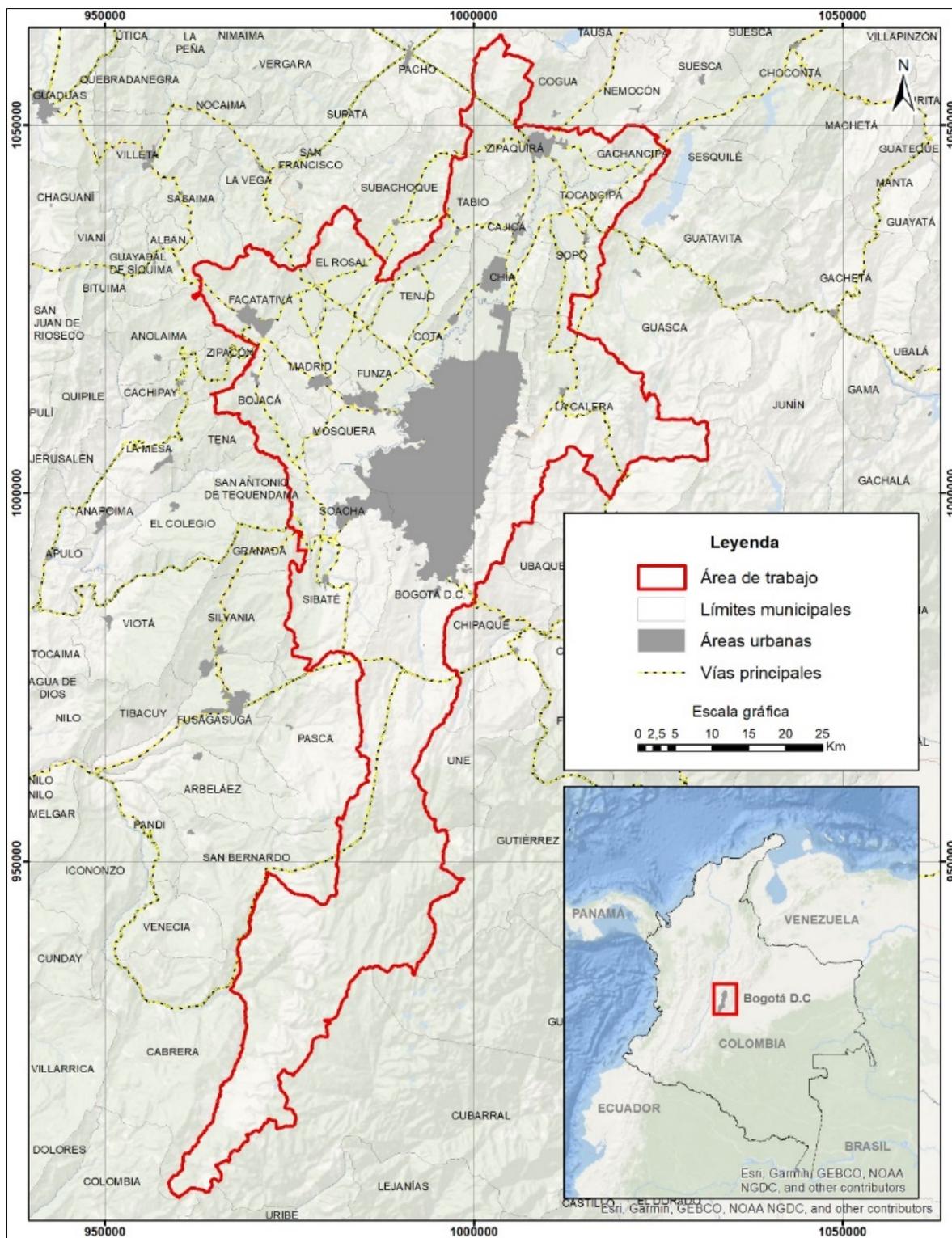


Figura 1. Área de trabajo (aproximadamente 371.175,50 ha).
Fuente: elaboración propia. Cartografía Base: IDECA, 2019; IGAC, 2021.

La región Bogotá es un territorio de importancia estratégica que se caracteriza por una alta densidad de población y una estructura productiva de

servicios, industria y actividades agropecuarias que jalonan un importante desarrollo económico para el país (Cámara de Comercio de Bogotá [CCB], 2015;

Región Central [RAPE], 2016). A nivel administrativo, se considera que las relaciones funcionales de la Región Bogotá dependen de la articulación de los elementos que estructuran su territorio: ambiental, rural, vial y urbano (DNP, 2014), por lo tanto, los municipios que hacen parte del área de estudio son aquellos que además de mantener una relación de continuidad urbana y vial, tienen relaciones en su estructura rural y ambiental.

Transformación del paisaje y su impacto en los servicios ecosistémicos relacionados con el flujo del carbono

En la evolución del concepto de paisaje se han desarrollado diferentes enfoques que tienen en común su interés por comprender la heterogeneidad espacial que resulta de las complejas relaciones en el espacio y el tiempo, y que se reflejan en un patrón característico (Armenteras & Vargas, 2016). Desde la mirada del análisis biofísico, el paisaje ha sido estudiado a partir de la parametrización y la modelización bajo diferentes objetivos (Barrera-Lobatón & Monroy-Hernández, 2014; Folch & Brú i Bistuer, 2017), a partir de lo cual se han construido escenarios donde interactúan entidades de acuerdo con reglas (ambientales y sociales) que determinan sus relaciones y condicionan las categorizaciones que buscan llegar a una estructura jerarquizada común (Riesco-Chueca et al., 2008; Sayer et al., 2013).

Desde esta perspectiva, se explora cómo el funcionamiento de los ecosistemas depende de las relaciones entre patrones espaciales y procesos que dan lugar a la heterogeneidad, es decir que el paisaje es el aspecto tangible del territorio que lo evidencia como un sistema construido sobre una matriz biofísica, un algoritmo socioecológico, donde la realidad ambiental ha sido intervenida por la historia del proceso antrópico (Folch & Brú i Bistuer, 2017; Riesco-Chueca et al., 2008). Esta visión de paisaje está orientada por la influencia de la epistemología de la geografía en la ecología del paisaje, donde se considera que los sistemas ecológicos son mediados por actividades humanas que, dependiendo del contexto espacial y temporal, configuran un sistema complejo que puede ser considerado como un paisaje homogéneo (Armenteras & Vargas, 2016).

Debido a la creciente demanda de recursos naturales, en una sociedad humana que busca fomentar o mantener su nivel de vida, los paisajes son construidos y transformados continuamente. El aumento progresivo de la intervención humana tiene un impacto a diferentes escalas, y es el crecimiento urbano y sus desarrollos asociados los que mayor influencia tienen en la reconfiguración de los paisajes, en especial en las áreas de borde o de transición urbano-rural (Gerecke et al., 2019). Desde una concepción ambientalista del borde urbano, las transformaciones son una amenaza a la sostenibilidad ambiental, pero a su vez un pretexto para iniciativas de conservación y la provisión de servicios ambientales, lo que ha llevado a la necesidad de administrar el paisaje con el fin de ordenar el territorio desde un enfoque integral que proporcione alternativas a la comprensión de su proceso de evolución hacia futuros deseables (Monroy-Hernández, 2014; Salazar & Cusva, 2014; Sayer et al., 2014).

De esta manera, los SE se articulan como forma de cuantificar las consecuencias de los cambios pasados sobre el paisaje y proyectar valoraciones de los cambios futuros que pueden afectar el bienestar humano (Gerecke et al., 2019). Conceptualizados como los beneficios directos e indirectos que los seres humanos obtienen y perciben de la biodiversidad (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] et al., 2014), inicialmente los SE fueron estimados a partir de valores sociales en términos económicos comparables con los precios del mercado. Sin embargo, estos fueron evolucionando como concepto y método que observa cómo ese bienestar es dependiente de los cambios que se dan en los ecosistemas, que pueden alterar la cantidad, calidad y oportunidad de intercambio de servicios ambientales hacia otras esferas, lo que genera condiciones de vulnerabilidad para las personas, comunidades y sectores que dependen de ellos (Rodríguez-Eraso et al., 2010). Por tanto, para evaluar estos impactos se requiere conocer en un marco amplio y detallado las relaciones y elementos que integran el paisaje, lo cual se logra con la cuantificación de los servicios del paisaje desde modelos de cambio de uso del suelo y sus impulsores, explorando las causas y consecuencias del cambio,

las transiciones y probabilidades de cambio a futuro (Gerecke et al., 2019).

Uno de los análisis más comúnmente utilizados para la evaluación de la transformación del paisaje han sido los análisis de pérdida de cobertura y degradación de la tierra. A partir de diversas metodologías, como el uso de índices radiométricos para la caracterización de relaciones entre la estructura y funcionalidad de los ecosistemas, se buscan identificar las áreas donde se ha perdido la cobertura vegetal o donde esta se ha visto afectada por procesos como la desertificación o la deforestación (Antunes et al., 2020; Gaitán et al., 2015). Estos elementos de análisis permiten estimar otros procesos, como la fijación y pérdida de carbono, basados en la estimación de transiciones a través del tiempo de la productividad primaria neta (PPN). Esta última es entendida como la capacidad productiva biológica de la tierra, que en el caso de las coberturas vegetales se refiere a la cantidad neta de carbono asimilada después de la fotosíntesis y la respiración autótrofa, que se almacena en la biomasa de las plantas —ramas y hojas— durante un período de tiempo (Clark et al., 2001; Vega-Araya & Alvarado-Barrantes, 2019).

La PPN permite resumir la tendencia en el tiempo de la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación, que puede ser utilizada para estimar indicadores a nivel regional de la biomasa producida y el estado de las coberturas, así como relacionarse con procesos de degradación cuando se presentan tendencias decrecientes (Cristiano, 2010; Gallego et al., 2011). Estos indicadores, que pueden ser analizados a través de sensores remotos, no deben entenderse como resultado de cambios lineales en el estado de la vegetación, sino como parte de los ciclos de la dinámica del paisaje; si bien estos indican tendencias, deben relacionarse con otros factores explicativos como los cambios ambientales (temperatura, precipitación, entre otros) y los disturbios generados por las actividades humanas (Easdale et al., 2019). La PPN puede variar significativamente dependiendo de la composición del suelo, de los tipos de cobertura y uso del suelo, de factores ambientales y de los patrones que estos configuran en el paisaje (Trifonova et al., 2021).

Estos cambios en conjunto generan procesos de degradación de la tierra que son definidos, según la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD), como aquellos que transforman, tanto en escala temporal como espacial, la cantidad y la calidad de los recursos de las tierras necesarios para sustentar las funciones y los servicios ecosistémicos, y que se expresan en fenómenos como, por ejemplo, la pérdida de coberturas vegetales, alteraciones en las características físicoquímicas de los suelos y cambios en los ciclos naturales del agua y del carbono (Antunes et al., 2020; León-Sicard, 2004; Lis-Gutiérrez, 2015). Por tanto, los modelos de estimación de la PPN y su relación con los cambios de cobertura permite inferir procesos de degradación e identificar aquellas áreas que requieren de un mayor seguimiento e implementación de acciones encaminadas a mejorar su manejo y conservación (Antunes et al., 2020; Gaitán et al., 2015).

Materiales y métodos

De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), existen dos métodos para el análisis de cambios en los contenidos de carbono: el primero es el método de cambio en la reserva, el cual identifica las reservas de carbono en un área específica por un período de tiempo, y el segundo es el método de pérdidas y ganancias, que mide el área de cambio de un tipo de cobertura a otra y el posible impacto de estos cambios sobre las reservas de carbono. En ambos casos se extrapolan los valores estimados de emisiones por tipo de cobertura (Ruíz-Guevara et al., 2020).

Este proyecto utilizó el método de ganancias y pérdidas, en el que primero se estima la PPN como análisis de referencia del estado del proceso biofísico de la fotosíntesis, mediante el cual la vegetación produce energía química útil neta a partir del CO₂ atmosférico, lo que se puede lograr desde el análisis de índices radiométricos como indicador de la captura de C (Vega-Araya & Alvarado-Barrantes, 2019). Esta metodología fue desarrollada por la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD, por sus siglas en inglés),

y se basa en la estimación de tres componentes de la productividad: trayectoria, estado y rendimiento (Sims et al., 2017).

El análisis desarrollado se centra en el uso de sensores remotos, los cuales permiten realizar estudios a gran escala de la superficie de la tierra, a partir de imágenes de resolución moderada (MODIS, por sus siglas en inglés), que pueden ser analizadas en diferentes series temporales con el fin de observar transiciones y cambios (Vega-Araya & Alvarado-Barrantes, 2019). A partir del aplicativo Trends.Earth del programa gestor de cartografía QGIS, se observaron las transiciones de cobertura vegetal, sus valores netos de productividad y su relación con la degradación del carbono orgánico del suelo (COS), para estimar los porcentajes de degradación en un periodo de tiempo de veinte años, distribuidos en tres ventanas de observación, de la siguiente manera: de 2001 a 2003 periodo inicial; 2004 a 2017, como periodo de transición y cambio, y 2017 a 2019 periodo final.

En el análisis de degradación de la tierra se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual es un indicador de la biomasa aérea como un potencial reservorio de carbono (Antunes Daldegan et al., 2020). En el aplicativo usado, a partir de una regresión lineal con una prueba de significancia no paramétrica de Mann-Kendall, se considera que los cambios significativos en p valor $\leq 0,05$ representan una tendencia positiva y por tanto una mejora potencial en la condición de la tierra, y las tendencias negativas significativas correspondrán a una potencial degradación (Sims et al., 2017).

A partir de la trayectoria del NDVI se evaluó la tasa de cambio de productividad observando la tendencia en las series de tiempo, es decir, desde 2001 hasta 2019; mientras que el indicador de estado permitió la detección de cambios recientes en la productividad primaria en comparación con el período de referencia, es decir, se comparó el período de 2001 a 2003 con el período final de 2017 a 2019. Finalmente, se estima el indicador de rendimiento, el cual analiza la productividad local en relación con la cobertura terrestre y las regiones bioclimáticas similares al área de estudio (Sims et al., 2017).

Si bien la herramienta Trends.Earth permite usar la cobertura vegetal de la plataforma ESA CCI a

una resolución de 300 m (Land Cover CCI Partnership, 2017), se buscó generar un mejor ajuste con el análisis de coberturas a nivel local con una resolución de 30 m para dos periodos de tiempo (el inicial y el final). Para esto se utilizaron dos imágenes Landsat TOA de la plataforma Google Earth Engine (GEE), las cuales detectan la reflectancia en la parte superior de la atmósfera en periodos anuales, cada tres o cinco años, lo que genera una composición donde el píxel más verde corresponde a aquel que tiene el valor más alto de NDVI durante el período seleccionado (USGS, 2021a, 2021b).

En el caso del COS, el aplicativo enlaza el geoservicio de los *stocks* de carbono de SoilGrids, con una resolución de 250 m, sin embargo, al revisar esta fuente de información, la estimación de COS para el área de estudio se realiza solo sobre siete perfiles de suelo, lo que puede implicar amplias diferencias con las condiciones locales reales. Por tanto, se utilizó el mapa de COS publicado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el cual se basó en la distribución porcentual de COS, como resultado de ponderar los valores a 30 cm de profundidad obtenidos de los perfiles de los estudios de suelo desarrollados por esta entidad a escala 1:100.000 (Bolívar et al., 2021). Si bien el mapa resultante del estudio del IGAC tiene una resolución de 1 km, este presenta datos locales de mayor fiabilidad con respecto a las estimaciones globales de SoilGrids, ya que para el área de estudio el IGAC se basó en 209 perfiles de suelo con verificación en campo.

Se aclara que estos valores son empíricos y se basan en una relación común entre la señal registrada y el respectivo parámetro de las coberturas, por tanto, los resultados obtenidos con este método solo pueden ser considerados como un diagnóstico indicativo a nivel paisaje que permite identificar lugares que pueden ser objeto de un estudio de detalle.

Análisis de resultados

En el análisis de productividad la trayectoria muestra un amplio porcentaje de áreas que tienden a la mejora y la estabilidad, que al compararse con el análisis de estado de productividad indican que esta tendencia de mejora se da en el último periodo de análisis, de 2017 a 2019. La trayectoria de todo el

periodo analizado muestra tendencias de degradación en el borde occidente de la ciudad de Bogotá y alrededores de los centros poblados de los municipios cercanos, lo que permite inferir una relación entre los cambios en la extensión de áreas urbanas y

la pérdida de cobertura que ha llevado a la degradación del paisaje. El estado de la productividad indica nuevamente que los mayores cambios se dieron en el occidente de la ciudad de Bogotá, y en los bordes de las áreas urbanas de los municipios de Funza,

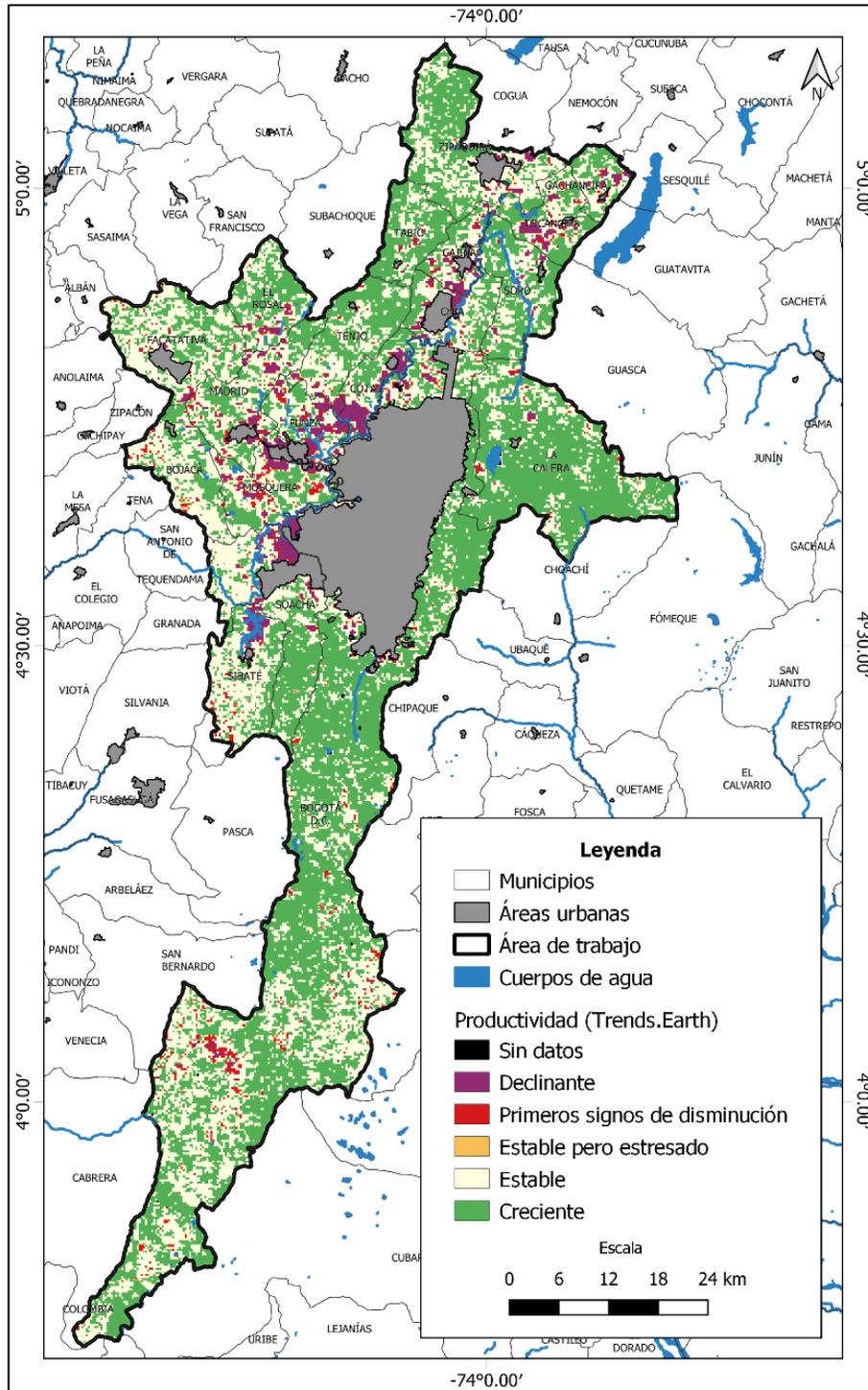


Figura 2. Valoración de la Productividad Total. Fuente: elaboración propia. Cartografía base de IDECA, 2019; IGAC, 2021.

Madrid, Mosquera, Facatativá, Cota, Chía, Cajicá, Zipaquirá, Tocancipá y Gachancipá. Sin embargo, el análisis de rendimiento de la productividad que integra el análisis de NDVI, el cambio de cobertura y los cambios en el COS, indica que el área que ha presentado una mayor degradación en los últimos veinte años ha sido el sector occidental del área rural del municipio de Mosquera, el borde sur de la ciudad de Bogotá hacia la zona rural de Ciudad Bolívar y el casco urbano del municipio de Soacha.

Para comprender el comportamiento final de la productividad, el aplicativo Trends.Earth establece una tabla de valoración, en la que a partir de las

características de la trayectoria, el estado y el rendimiento genera una agregación final en cinco clases (Figura 2), las cuales dan como resultado los siguientes valores: productividad creciente que corresponde al 52,8% del área de trabajo (175 904,80 ha aproximadamente), estable con un 38,7% (128 984,67 aprox.), estable pero estresado 0,1% (481,84 ha aproximadamente), primeros signos de disminución 2,5% (8485,88 ha aproximadamente) y declinante en un 5,7% (18 953,11 ha aproximadamente). Al observar el panorama por municipios, aquellos en los que la productividad ha tenido una mayor disminución han sido Cajicá, Cota, Chía, Funza y

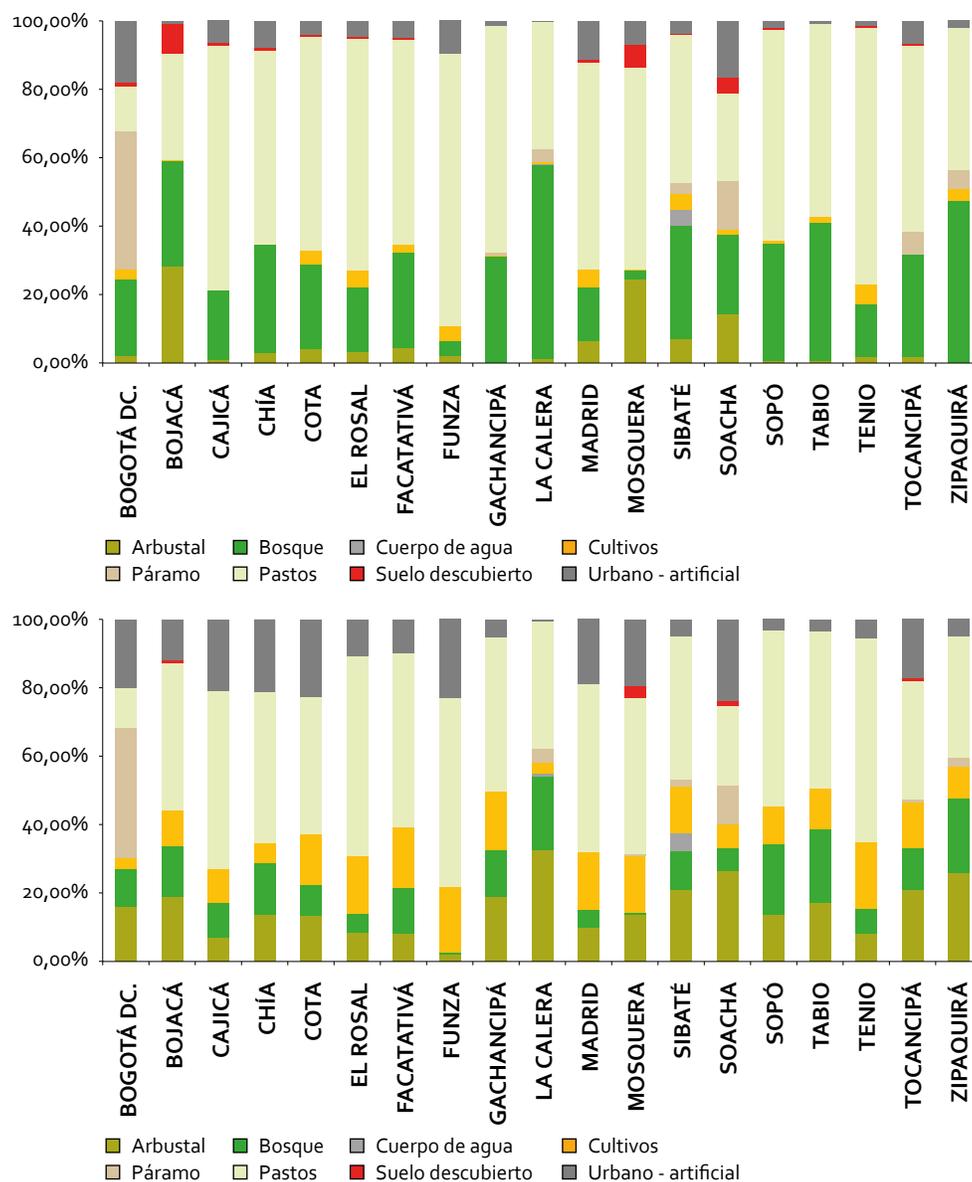


Figura 3. Coberturas para el periodo inicial y el periodo final por municipio. Fuente: elaboración propia.

Mosquera, con valores de porcentaje de pérdida oscilando entre 20% y 30% de su extensión territorial, a lo que se le suma un porcentaje de áreas con primeros signos de disminución del 10%.

En el análisis de coberturas del área de estudio, el primer periodo comprendido entre 2001 a 2003, las más representativas fueron los pastos y los bosques, seguidos de las áreas de páramo. Para el periodo final de 2019, las coberturas por municipio más representativas fueron los pastos, páramos y arbustales, seguidas de las áreas urbanas.

Entre estos dos periodos, las áreas de arbustales aumentaron en un 14%, principalmente por encima de las áreas de bosque y en menor medida sobre las de páramo, al igual que las áreas de cultivo sobre zonas que anteriormente eran de bosque y pastos. La categoría urbano-artificial fue la cobertura que tuvo un mayor crecimiento, seguida de los cultivos, mientras que las áreas naturales de bosque y páramo se redujeron en un 15% y 2%, respectivamente, para dar paso a áreas de arbustal. Al analizar estos cambios a partir de una matriz de transiciones se observa que se dio una alta pérdida de pastizales, seguida de la pérdida de áreas naturales de bosques, páramos y arbustales.

En la estimación de los cambios en las existencias de COS con respecto a la transición de coberturas, se obtiene un mapa de degradación que indica que las áreas del borde sur de Bogotá, entre el límite urbano del municipio de Soacha, las áreas rurales de los municipios de Mosquera y Madrid, Funza, Cota, Tocancipá, Facatativá, El Rosal y Bojacá, y alrededores del área urbana de Chía y Cajicá, presentaron una mayor degradación. También se evidencian algunos parches de degradación en el extremo sur del área de estudio, que corresponde al páramo de Sumapaz, en inmediaciones del parque nacional que lleva el mismo nombre, y que se relaciona con la vía que conduce al centro poblado rural La Unión.

Discusión de resultados

El análisis de productividad permitió observar que las áreas de degradación se encuentran rodeadas de zonas donde se mantiene una estabilidad en las condiciones de NDVI medio para todo el periodo de análisis, lo que sugiere pocos cambios en la

extensión de parches de cobertura vegetal. Al observar el estado de productividad, indicador que mide los cambios recientes, se encuentra que las áreas de degradación observadas en la trayectoria corresponden a cambios que se han dado en el último periodo, es decir que se han intensificado a partir del año 2017, especialmente en los municipios de Bojacá y La Calera, seguidos por Funza, Madrid, Mosquera y Sibaté, y las zonas rurales de Bogotá.

También se observó que, en contraste, hay un alto porcentaje de áreas que tienden a la mejora de sus condiciones de productividad en el análisis de trayectoria, relacionadas con las áreas montañosas de los cerros orientales de Bogotá y las áreas rurales al sur de este distrito, en las cuencas altas del río Tunjuelo, río Blanco y río Sumapaz, así como en la zona rural del municipio de la Calera. Estas son áreas que se encuentran bajo figuras de conservación como son la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá, la Reserva Forestal Protectora Productora Cuenca Alta del Río Bogotá, el Parque Nacional Natural Chingaza y el Parque Nacional Natural Sumapaz.

Al comparar estas áreas con aquellas que mejoraron, solo en el último periodo se observa que en las calificadas como estables y de mejora, que se encuentran poco intervenidas, las condiciones de productividad no solo se han mantenido, sino que han tendido a la mejora desde 2017, en los municipios de Facatativá, La Calera, Funza, Madrid y Sibaté. En el caso de los municipios de La Calera, Funza y Sibaté los resultados indican que los procesos de degradación han permanecido acotados a las mismas áreas y no han sido extensivos sobre las áreas que han mantenido una tendencia estable. Al observar el rendimiento de la productividad, en el que se analizan los factores bioclimáticos locales con respecto a los valores medios de NDVI, las áreas de mayor degradación se localizan en el municipio de Soacha y Mosquera, lo que indica una influencia de factores climáticos que deben ser analizados con más a detalle, pues estas áreas mantienen unas condiciones más secas que el resto del área (IDEAM et al., 2014).

El indicador final de degradación indicó que las áreas tendientes a la degradación corresponden al 19,7%, las áreas estables a un 31,8% y las áreas que tienden a la mejora a un 48,5% del área de trabajo;

las áreas degradadas se relacionan con el cambio de pastizales a zonas artificiales, y de bosques a pastizales, áreas de cultivo y áreas artificiales. Las áreas donde principalmente se observan signos de degradación se encuentran en las zonas planas del borde occidente de la ciudad de Bogotá, y los alrededores de los cascos urbanos de Funza, Madrid, Mosquera, Soacha, Bojacá, Cota y Chía. Estos son los mismos municipios que, de acuerdo con el diagnóstico realizado en el marco del Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuenca (POMCA) del río Bogotá, mantienen una alta tasa de cambio de coberturas, donde las coberturas naturales remanentes presentan entornos de alta transformación con una alta degradación (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR], 2019).

Hacia el borde sur del sector urbano de Bogotá también se encuentra una importante área de degradación que se extiende hacia la zona rural sobre la cuenca del río Tunjuelo, que se relaciona con la extensión de barrios informales. Continuando hacia el área rural sur se observan pequeños parches de degradación en las cuencas del río Blanco y el río Sumapaz, posiblemente asociados con algunas intervenciones de cultivos. Un patrón similar se observa en la cuenca alta del río Teusacá y los municipios de La Calera y Sopó, en zonas donde se han generado diferentes desarrollos formales de vivienda campestre.

Esto evidencia, como lo mencionan Armenteras y Vargas (2016), la relación entre la transformación del paisaje y su configuración, en cómo los elementos que lo conforman han variado en el tiempo condicionados por un elemento dominante, a saber: el crecimiento urbano. Los cambios se han dado precisamente en los bordes de transición urbano-rural tanto de Bogotá como en los otros centros urbanos cercanos, lo que ha conformado un patrón de parches de áreas degradadas que se extienden en sus alrededores. Estos parches han sido clasificados por Folch y Bru i Bistuer (2017) como “paisajes paraurbanos”, caracterizados por la presencia de diversos elementos urbanos en el medio rural de forma discontinua o a manera de islas.

En el resto de los municipios y en el área rural de Bogotá, se evidencian parches de degradación de menor área, originados por la pérdida de coberturas

naturales remanentes, que a su vez se relacionan con respuestas bajas del NDVI e indicadores de degradación o signos tempranos de esta en los estados de productividad y degradación en el COS. Aunque Bogotá presenta una proporción menor de degradación, esto puede deberse a que su extensión es mayor al resto de los municipios y el indicador se ve influenciado por esta. Es claro que los bordes occidente, norte y sur, y la zona alta de la cuenca del río Tunjuelo, se encuentran en constante presión por las transformaciones urbanas, lo cual se ha documentado ampliamente al considerarse que estas áreas cambian constantemente en la medida que la intensidad y características de los conflictos socioambientales se transforman. Esto ha llevado a la inclusión de conceptos como ordenamiento de borde, franjas de adecuación o de borde y modelos de ocupación de borde, en la normativas de ordenamiento territorial (Alcaldía Mayor de Bogotá et al., 2015). De manera que esta se configura como un área de interés para el estudio de relaciones de borde urbano-rural desde diferentes enfoques.

Se considera que estas áreas degradadas potencialmente tienen efectos negativos sobre el SE de regulación del flujo de carbono, por concentrar en ellas parches donde se ha perdido la cobertura vegetal y han reflejado cambios continuos en la productividad, lo que es un indicador de afectaciones en la estructura y funcionalidad de los ecosistemas de la región (Antunes et al., 2020). De acuerdo con el indicador de degradación de la tierra analizado con Trends.Earth, relacionado con cambios en los contenidos de COS en el área de estudio, el resultado indicó que la proporción de área degradada ha sido de 21,02%, mientras que el área donde se ha presentado un mejoramiento corresponde a un 46,88%, y las áreas que han tenido menos cambios se encuentran en un 32,07% del área total.

Estos resultados se deben a que el cambio de COS se calculó en función de las transiciones anuales de la cobertura terrestre como porcentaje de la reserva inicial (es decir, desde el año base 2001 hasta el año final 2019), como se muestra en la Tabla 1. En la Tabla 2, la estimación de los cambios del carbono orgánico indica que en la cobertura de pastos se generó una pérdida aproximada de 6,14 t/ha, y en las áreas de coberturas naturales

Tabla 1. Estimación del cambio del carbono orgánico del suelo entre el año base y el año final de acuerdo con las transiciones de coberturas

| | Áreas naturales (arbustales, bosques y páramo) | Pastos | Cultivos | Áreas urbanas y artificiales |
|--|--|---------|----------|------------------------------|
| Áreas naturales (arbustales, bosques y páramo) | -0,06 % | -0,44 % | -8,54 % | -36,67 % |
| Pastos | -1,09 % | -0,64 % | -9,29 % | -37,16 % |
| Cultivos | 18,47 % | 16,21 % | 1,61 % | -36,59 % |
| Áreas urbanas y artificiales | 40,68 % | 41,31 % | 42,08 % | 0,69 % |

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Estimación aproximada de los cambios en el carbono orgánico del suelo

| | Carbono orgánico del suelo de referencia 2001 (toneladas/ha) | Carbono orgánico del suelo objetivo 2019 (toneladas/ha) | Cambio en la materia orgánica del suelo (toneladas) | Cambio en el carbono orgánico del suelo (porcentaje) |
|--|--|---|---|--|
| Áreas naturales (arbustales, bosques y páramo) | 122,82 | 121,68 | -1777,902 | -7,67 % |
| Pastos | 103,90 | 97,75 | -2587 041,1 | -19,63 % |
| Cultivos | 127,76 | 142,48 | 2899 313,4 | 23,82 % |

Fuente: elaboración propia.

(arbustales, páramo y bosques) la pérdida fue de 1,15 t/ha, mientras que en las áreas de cultivo se generó una ganancia de captura de 14,71 t/ha. Esto también evidencia cómo los cambios se deben no solo a la extensión de áreas urbanas y artificiales, sino también a la extensión de áreas de cultivo, como el aumento de zonas de invernaderos, que se dieron principalmente donde antes existían pastos y áreas de vegetación natural.

Sin embargo, para tener una perspectiva más amplia de cómo se ha afectado el SE de almacenamiento y captura del carbono, es necesario relacionar los cambios y áreas de degradación con otros factores ambientales como los cambios en el clima o socioeconómicos, generados por los motores de expansión urbana (Rodríguez-Eraso et al., 2010), ya que los coeficientes con los que la metodología implementada calcula los cambios en las reservas de carbono se basan en la cobertura vegetal como indicador indirecto del uso de la tierra. Como mencionan Rodríguez-Eraso et al. (2010), los cambios en el clima también se relacionan a las variaciones en la fotosíntesis y fenología en diferentes tipos de coberturas, lo que permite encontrar tendencias interanuales de la dinámica de la vegetación frente a cambios ambientales.

Otro de los elementos para comprender a profundidad los comportamientos del COS es la medición

directa soportada con el análisis de tipos de suelos y su interacción con la vegetación, pues de acuerdo con Lopera (2019), se estima que el carbono contenido en el suelo es hasta tres veces mayor al contenido en la atmósfera y la vegetación. En su análisis del flujo de CO₂ en suelo con respecto a coberturas de herbazales abiertos de páramo y plantaciones de eucalipto, Lopera identificó que los cambios en las temperaturas del suelo y ambiental son los principales factores relacionados con este proceso. Otros estudios, como los de Robert (2002) y Suárez-Duque et al. (2016), han encontrado que cuando la vegetación se remueve los suelos sufren un proceso de degradación o compactación que genera la pérdida gradual del C, lo que rompe el flujo natural de captura y fijación, en especial cuando se realiza una intensa actividad agropecuaria.

Conclusiones

El uso de índices de vegetación, como el NDVI, permiten realizar el monitoreo de una amplia región, lo que resulta útil al comparar los cambios en los valores del índice con posibles transformaciones en la distribución de coberturas vegetales. Sin embargo, esto no indica una relación causa-efecto, ya que los cambios en la vegetación deben valorarse de forma puntual con otras variables, como, por ejemplo, la

incidencia de factores climáticos y biológicos que contribuyen a la variación temporal del NDVI.

Con respecto al análisis de productividad en sus tres fases —trayectoria, estado y rendimiento—, se observó que en las dos primeras se mantiene un patrón de degradación de las coberturas vegetales asociado a los cascos urbanos y sus alrededores, principalmente en los municipios de Sibaté, Soacha, Mosquera, Funza y La Calera; y, en menor proporción, Cota, Chía, Gachancipá y Tocancipá. Por su parte, en las áreas rurales de estos municipios se mantienen condiciones de productividad similares a lo largo del periodo del tiempo analizado e incluso tienden a la mejora en el último periodo, es decir entre 2017 y 2019. De manera que estas áreas se consideran de vital importancia para generar procesos de manejo integrado del paisaje en zonas de borde urbano rural.

La integración de los resultados de productividad, cambio de cobertura y cambio de COS indicaron que las áreas de degradación que presumiblemente han tenido mayores impactos en su capacidad de regular el flujo del carbono durante el periodo analizado, ocupan el 10% del área total, lo que equivale aproximadamente a 38 807,7 ha, las cuales se concentran en los alrededores de las áreas urbanas de los municipios de Funza, Madrid, Mosquera, Cota, Tocancipá y Soacha, y en los alrededores de la represa El Muña en el municipio de Sibaté. Esto corrobora la hipótesis de que el crecimiento urbano de la ciudad de Bogotá y su región ha generado cambios en la extensión de la cobertura vegetal y su potencial capacidad para regular el flujo de carbono, por lo que se convierten en áreas que requieren igualmente de la implementación de acciones de manejo integrado del paisaje. También existe una amplia área donde las condiciones de productividad han mejorado y representan una oportunidad para el almacenamiento y captura de carbono; estas corresponden al 38% del área de trabajo donde se encuentran coberturas naturales y pueden considerarse como importantes reservorios de C para analizar.

Con respecto a la transformación del paisaje por cambio de coberturas, se concluyó que los principales cambios se dieron por la transformación de bosques y arbustales a zonas de pastos y cultivos, y de pastizales a áreas urbanas y artificializadas. Por

tanto, sobre estas áreas se pueden enfocar estudios relacionados con las alteraciones en la vegetación, cambios en los patrones de distribución y riqueza de especies, alteraciones en los patrones fenológicos y priorización de áreas de restauración.

Las áreas dentro del perímetro urbano de Bogotá presentaron resultados de coberturas difíciles de verificar en la escala de trabajo utilizada, por lo que la información presentada solo puede ser utilizada como un indicador del medio rural y regional de Bogotá. Para llegar a un análisis de la vegetación urbana, es necesario emplear una escala más detallada y realizar el análisis en áreas de referencia más pequeñas, excluyendo los objetos urbanos, los cuales pueden generar errores en la identificación de coberturas por sensores remotos, por ejemplo, cuando se encuentran techos rojos o naranja que se pueden interpretar como suelo descubierto o techos verdes que se confunden con la vegetación y, por tanto, generan valores erróneos del NDVI.

Finalmente, las estimaciones de reservas y pérdidas de carbono se deben llevar a análisis situados con información detallada que permita tener un panorama más ajustado a la realidad del lugar, es decir, a partir de datos tomados en campo que aporten a la comprensión de las dinámicas y transformaciones del flujo de carbono y su relación con cambios del uso de la tierra. Igualmente, se recomienda contrastar la información con cambios en temperatura y precipitación para identificar otros posibles factores que influyeron en la degradación más allá de la expansión urbana, así como un análisis prospectivo con base en el comportamiento de las transformaciones que aporte a la identificación de posibles áreas a priorizar para la protección y restauración, especialmente en las zonas de borde urbano.

Bibliografía

- Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría del Hábitat, Melo, G., Rúa, J. A., & Rey, D. (2015). *Modelo de ocupación territorio Borde Oriental*. Secretaría del Hábitat.
- Antunes, G., Noon, M., Zvoleff, A., & Gonzalez-Roglich, M. (2020). A Review of Publicly Available Geospatial Datasets and Indicators in Support of Land Degradation Monitoring. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4162290>
- Armenteras, D., & Vargas, O. (2016). Patrones de paisaje y escenarios de restauración en Colombia: Acercando

- escalas. *Acta Biológica Colombiana*, 21(1), 229-239. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v21n1sup.50848>
- Barrera-Lobatón, S., & Monroy-Hernández, J. (eds.). (2014). *Perspectivas sobre el paisaje* (1 ed). Universidad Nacional de Colombia; Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.
- Bolívar, A., Camacho, C. A., Ordóñez, N., Gutiérrez, J., Álvarez, G., Guevara, M., Olivera, C., Olmedo, G., Bunning, S., & Vargas, R. (2021). Estimación de carbono orgánico del suelo en Colombia, una herramienta de gestión del territorio. *Ecosistemas*, 30(1), 2019. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2019>
- Buytaert, W., Sevink, J., & Cuesta, F. (2014). Cambio climático: La nueva amenaza para los páramos. En *Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos* (pp. 505-525). Condesan.
- Cámara de Comercio de Bogotá (CCB). (2015). *Estado de Bogotá Región. Documento maestro de diagnóstico sobre la situación y retos de Bogotá Región para precandidatos a la Alcaldía Mayor de Bogotá y a la Gobernación de Cundinamarca*.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (2019). *Síntesis Ambiental. POMCA río Bogotá* (vol. VII). <https://www.car.gov.co/vercontenido/94>
- Clark, D. A., Brown, S., Kicklighter, D. W., Chambers, J. Q., Thomlinson, J. R., Ni, J., & Holland, E. A. (2001). Net primary production in tropical forests: An evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications*, 11(2), 371-384. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[0371:NPPITF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[0371:NPPITF]2.0.CO;2)
- Cristiano, P. M. (2010). Estimación de la Productividad Primaria mediante el Modelo de Eficiencias y Sensores Remotos. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32765.46562>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2014). *Misión sistema de ciudades. Una política para el sistema de ciudades colombiano con visión a largo plazo*.
- Easdale, M. H., Fariña, C., Hara, S., Pérez León, N., Umaña, F., Tittonell, P., & Bruzzone, O. (2019). Trend-cycles of vegetation dynamics as a tool for land degradation assessment and monitoring. *Ecological Indicators*, 107, 105545. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105545>
- Folch, R., & Brú i Bistuer, M. J. (2017). *Ambiente, territorio y paisaje. Valores y valoraciones*. Universidad de los Andes.
- Gaitán, J. J., Donaldo Bran, D. E., & Azcona, C. (2015). Tendencia del NDVI en el período 2000-2014 como indicador de la degradación de tierras en Argentina: ventajas y limitaciones. *Agriscientia*, 32(2), 83-93.
- Gallego, F., Lezama, F., Pezzani, F., López-Mársico, L., Leoni, E., Mello, A. L., & Costa, B. (2011). Estimación de la productividad primaria neta aérea y capacidad de carga ganadera: Un estudio de caso en Sierras del Este, Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 21(1), 120-130.
- Gerecke, M., Hagen, O., Bolliger, J., Hersperger, A. M., Kienast, F., Price, B., & Pellissier, L. (2019). Assessing potential landscape service trade-offs driven by urbanization in Switzerland. *Palgrave Communications*, 5(1), 109. <https://doi.org/10.1057/s41599-019-0316-8>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Alcaldía Mayor de Bogotá, Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), Corporación Autónoma Regional del Guavio (Corpoguavio), Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Parques Nacionales Naturales de Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), & Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2014). *Enfoque territorial para el cambio climático. Plan Regional Integral de Cambio Climático de Bogotá-Cundinamarca* (PRICC).
- León-Sicard, T. (2004). *Relaciones agricultura-ambiente en la degradación de las tierras en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. https://idea.unal.edu.co/publica/docs/Degradacion_Tierras_Colombia.pdf
- Lis-Gutiérrez, M. (2015). *Carbono como indicador de degradación de la calidad del suelo bajo diferentes coberturas en el páramo de Guerrero* [tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional. <https://repositorio.institucional.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/55409/53120928.2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lopera, M. C. (2019). Flujo de CO2 del suelo bajo diferentes coberturas de la Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43(167), 234-240. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.823>
- Marcotullio, P. J. (2016). Urbanization, energy use and greenhouse gas emissions. En *The Routledge handbook of urbanization and global environmental change* (1 ed., pp. 130-148). Routledge, Taylor & Francis Group.
- Monroy-Hernández, J. (2014). Las áreas protegidas como elemento ordenador de los paisajes de borde. En *Perspectivas sobre el paisaje* (pp. 419-436). Universidad Nacional de Colombia; Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.
- Región Administrativa y de Planeación Especial (RAPE). (2016). *El sistema de ciudades de la Región Central: configuración y desafíos*.
- Revi, A., Satterthwaite, D. E., Aragón-Durand, F., Corfee-Morlot, J., Kiunsi, R. B. R., Pelling, M., & Roberts, D. C. (2014). Urban areas. En *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 535-612). Cambridge University Press.
- Riesco-Chueca, P., Gómez-Zotano, J., & Álvarez-Sala, D. (2008). Región, comarca. Lugar: Escalas de referencia

- en la metodología del paisaje. *Cuadernos Geográficos*, 42, 227-255.
- Robert, M. (2002). *Captura de carbono en suelos para un mejor manejo de la tierra*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Rodríguez-Eraso, N., Pabón-Caicedo, J. D., & Bernal-Suárez, N. R. (eds.). (2010). *Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Ruíz-Guevara, N., Delgado-Rodríguez, D., & Carrera Gambetta, F. (2020). *Tecnologías para el monitoreo de impactos y emisiones de carbono del aprovechamiento forestal y de la trazabilidad de la madera de bosques naturales en Latinoamérica y el Caribe*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Salazar, P., & Cusva, A. (2014). Administración del paisaje. En *Perspectivas sobre el paisaje* (pp. 371-418). Universidad Nacional de Colombia; Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.
- Sayer, J., Sunderland, T., Ghazoul, J., Pfund, J.-L., Sheil, D., Meijaard, E., Venter, M., Boedhihartono, A. K., Michael, D., Claude, G., van Oosten, C., & Buck, L. (2013). Ten principles for a landscape approach to reconciling agriculture, conservation, and other competing land uses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(21), 8349-8356. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210595110>
- Sayer, J., Margules, C., Boedhihartono, A. K., Dale, A., Sunderland, T., Suprianta, J., & Saryanthi, R. (2014). Landscape approaches; what are the pre-conditions for success? *Sustainability Science*, 10(2), 345-355. <https://doi.org/10.1007/s11625-014-0281-5>
- Sims, N. C., Green, C., Newman, G. J., England, J. R., Held, A., Wulder, M. A., Herold, M., Cox, S. J., Huete, A. R., Kumar, L., Viscarra-Rossel, R. A., Roxburgh, S. H., & Mackenzie, N. J. (2017). *Good Practice Guidance SDG Indicator 15.3.1. Proportion of land that is degraded over total land area*. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD).
- Suárez-Duque, D., Acurio, C., Chimbolema, S., & Aguirre, X. (2016). Análisis del carbono secuestrado en humedales altoandinos de dos áreas protegidas del Ecuador. *Ecología Aplicada*, 15(2), 171. <https://doi.org/10.21704/rea.v15i2.756>
- Trifonova, T. A., Mishchenko, N. V., Shutov, P. S., & Bykova, E. P. (2021). Estimation of the Dynamics of Production Processes in Landscapes of the South Taiga Subzone of the Eastern European Plain by Remote Sensing Data. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 76(1), 11-18. <https://doi.org/10.3103/S0147687421010063>
- United Nations Human Settlements Program (ed.). (2011). *Cities and climate change: Global report on human settlements*. Earthscan.
- Vega-Araya, M., & Alvarado-Barrantes, R. (2019). Análisis de las series de tiempo de variables biofísicas para cuatro ecorregiones de Guanacaste, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(2), 60-96. <https://doi.org/10.15359/rca.53-2.4>