



Estimación de la captura de carbono en un relicto de bosque urbano mediante técnicas de teledetección *

Claudia Marcela Cardona Lindo**

Julián Garzón Barrero***

Gonzalo Jiménez Cleves****

Recibido: 23/11/2018 • Aceptado: 28/06/2019

<https://doi.org/10.22395/riium.v19n37a1>

Resumen

El objetivo de este trabajo es calcular la capacidad de captura de CO₂ del relicto boscoso de la Universidad del Quindío que recibe el nombre de “Jardín Botánico Cedro Rosado” a través de técnicas que integran mediciones *in situ* y teledetección. En esta primera fase se obtendrán las imágenes multiespectrales, índices de vegetación diferencial normalizado (NDVI), mejorado (EVI) y ajustado al suelo, (SAVI), y la clasificación basada en objetos. En una segunda fase se medirán variables arbóreas y se estimarán las variables biofísicas índice de área foliar (LAI) y fracción de radiación activa fotosintéticamente absorbida (Fapar) con el instrumento Tracing Radiation and Architecture of Canopies (Trac) para correlacionarlas con los índices de vegetación. Esto definirá las constantes del modelo exponencial de regresión a través del establecimiento de la ecuación alométrica local, para interpolar la biomasa contenida en la zona de estudio y relacionarla con su capacidad de almacenamiento de CO₂.

Palabras clave: captura de carbono; teledetección; ecuaciones alométricas; índices de vegetación; variables biofísicas; clasificación de imagen basada en objetos.

* Artículo derivado de la investigación “Estimación del carbono capturado por un bosque urbano mediante herramientas de teledetección” (en curso).

** Magíster en Ingeniería de Recursos Hídricos y Medio Ambiente (Universidad del Quindío), especialista en gestión ambiental, y química. Coordinadora del Sistema de Gestión Ambiental de la Universidad del Quindío, e investigadora del Grupo Geoides G62. Correo electrónico: cmcardona@uniquindio.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1370-0869>.

*** Estudiante de Doctorado en Ingeniería Geomática, Universidad Politécnica de Madrid. Magíster en sistemas de información geográfica. Especialista en geomática. Profesor del Programa de Ingeniería Topográfica y Geomática e investigador del Grupo Geoides G62, Universidad del Quindío. Correo electrónico: juliangarzonb@uniquindio.edu.co. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4871-3726>.

**** Magíster en ingeniería de sistemas. Profesor del Programa de Ingeniería Topográfica y Geomática y líder del grupo de investigación Geoides G62, Universidad del Quindío. Correo electrónico: gjcleves@uniquindio.edu.co. Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-0769-9729>

Estimation of Carbon Capture in an Urban Forest Relict through Teledetection Techniques

Abstract

The objective of this study is to calculate the capacity of CO₂ capture from the forest relict of the University of Quindío “Jardín Botánico Cedro Rosado” through the use of techniques that integrate in situ measurements with remote sensing. In the first phase, multispectral images, Normalized Differential Vegetation Index (NDVI), Improved Vegetation Index (EVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), and object-based classification will be obtained. In the second phase, tree variables will be measured, and Leaf Area Index (LAI) and the Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (Fapar) biophysical variables will be estimated with the Tracing Radiation and Architecture of Canopies (TRAC) optical instrument, in order to correlate them with the vegetation indexes. This will define the constants of the exponential regression model defining the local allometric equation, which will interpolate the biomass in the entire image.

Keywords: Carbon caption; remote sensing; allometric equation; vegetation indices; biophysical variables; OBIA.

Estimativa da captura de carbono num relicto de floresta urbana mediante técnicas de sensoriamento remoto

Resumo

O objetivo deste trabalho é calcular a capacidade de captura de CO₂ do relicto arborizado da Universidad del Quindío que recebe o nome de “Jardim Botânico Cedro Rosado” por meio de técnicas que integram medidas *in situ* e detecção remota. Nessa primeira fase, serão obtidas as imagens multiespectrais, índices de vegetação diferencial normalizada (NDVI), melhorado (EVI) e ajustado ao solo (SAVI), e a classificação baseada em objetos. Numa segunda fase, serão medidas variáveis arbóreas e serão estimadas as variáveis biofísicas índice de área foliar (LAI) e a fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (Fapar) com o instrumento Tracing Radiation and Architecture of Canopies (Trac) para correlacioná-las com os índices de vegetação. Isso definirá as constantes do modelo exponencial de regressão por meio do estabelecimento da equação alométrica local, para interpolar a biomassa contida na zona de estudo e relacionar com sua capacidade de armazenamento de CO₂.

Palavras-chave: captura de carbono; sensoriamento remoto; equações alométricas; índices de vegetação; variáveis biofísicas; classificação de imagem baseada em objetos.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global es el aumento de la temperatura media de la superficie terrestre como resultado del aumento de concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI). Es bien conocido que la liberación de CO₂ a través de diversas fuentes es uno de los causales de este calentamiento. A través del proceso de fotosíntesis los bosques capturan CO₂, lo fijan en sus estructuras vivas, lo acumulan en su biomasa y lo transfieren al mantillo en descomposición, y así se constituyen en reservas de carbono [1]. Esta importancia mundial de los ecosistemas forestales insiste en la necesidad de determinar con precisión la cantidad de carbono almacenado en los bosques.

Existen diferentes métodos convencionales para cuantificar la captura de CO₂, muchos de los cuales son complejos, costosos y de cobertura limitada [2]. A este respecto, la posibilidad de estimar la biomasa y carbono a través de técnicas de teledetección representa una alternativa importante para sortear estas limitaciones, y ha sido ampliamente reportada en estudios a diversas escalas y ambientes especiales [3-5]. Para estimaciones de almacenamiento de CO₂, IPCC [6] sugiere aplicar una fracción del 50 % de la biomasa aérea.

La estimación de la biomasa es una tarea difícil, especialmente en zonas con estructuras de condiciones ambientales complejas [7]. Los modelos alométricos han sido desarrollados para aplicaciones en bosques naturales y plantaciones forestales, pero su uso reviste limitaciones debido a condiciones naturales locales —tales como forma del árbol y arquitectura del dosel—, lo que sugiere desarrollar modelos locales de estimación [8-9]. A este respecto, los métodos de estimación de biomasa y carbono a partir de sensores remotos necesitan la integración de información de campo, basada en un muestreo espacial suficiente, y el uso de las ecuaciones alométricas apropiadas para mejorar su estima y asegurar su robustez [10-11]

Los vehículos aéreos no tripulados (*unmanned aerial vehicles*, UAV) equipados con sensores espectrales ligeros facilitan el análisis de vegetación con procedimientos no destructivos [12]. En los últimos años, los sistemas UAV han llamado la atención de las geociencias debido a la posibilidad de capturar datos de forma rentable a altas resoluciones espaciales y temporales [13]. En los trabajos con UAV donde se busca discriminar entre especies individuales de vegetación, Torres-Sánchez *et al.* [14] recomiendan resoluciones espaciales inferiores a cuatro centímetros que se logran con alturas de vuelo inferiores a 100 metros. A fin de corregir el posicionamiento geográfico de los elementos capturados en la escena, es necesario establecer puntos de control terrestre (GCP) distribuidos de manera uniforme en la zona de trabajo [15-16].

La atmósfera es la fuente primaria de ruido para la medición precisa de la reflectancia superficial con sensores remotos ópticos [17-18]. Los efectos de la atmósfera sobre los índices de vegetación son relevantes: Agapiou *et al.* [19] encontraron diferencias significativas de hasta 15 % entre hacer o no correcciones atmosféricas en el cálculo del NDVI. Homem *et al.* [20], a su turno, evaluaron los efectos atmosféricos en el NDVI y el SAVI utilizando el algoritmo de corrección 6S: encontraron que para la obtención de valores ajustados de estos índices es necesario corregir atmosféricamente las imágenes; así mismo, concluyen que estos efectos tienen alta incidencia cuando se busca relacionar los índices de vegetación con variables biofísicas como LAI y biomasa, por lo cual recomiendan efectuar mediciones de campo para ajustar los modelos.

El dosel forestal es la frontera entre la atmósfera y la superficie terrestre; la comprensión de su estructura es importante para modelar la captura de gases atmosféricos como el CO₂ [21]. El LAI es un atributo estructural de los ecosistemas forestales a través del cual se han realizado investigaciones en estimativos de producción forestal y capacidad de captura de carbono [22], su correcta estimación es esencial para impactos de ecosistemas sobre el clima, el ciclo biogeoquímico y el balance energético [23]. Para medir de manera precisa y eficiente el LAI y Fapar se utiliza el instrumento óptico que recibe el nombre de Tracing Radiation and Architecture of Canopies (Trac): a través de la interceptación de la luz que pasa por el dosel, logra definir su estructura [24].

Con el trabajo presentado aquí se pretende calcular la capacidad de captura de CO₂ del relicto boscoso “Jardín Botánico Cedro Rosado” de la Universidad del Quindío mediante la integración de técnicas de teledetección con datos de campo. Para lograr este objetivo, en la fase inicial del trabajo se parte de la compactación del ortomosaico de la zona de estudio con los valores de reflectancia necesarios para calcular los índices de vegetación NDVI, EVI y SAVI. Será necesario discriminar las diversas especies vegetales a través de la clasificación de imagen basada en objetos (OBIA), lo que llevará a definir las áreas de mediciones *in situ* de variables arbóreas. En la segunda fase, para el cálculo de las variables biofísicas LAI y Fapar, se utilizará el instrumento óptico Trac, el cual registra la transmisión de luz directa del dosel a través de los transectos diseñados. Finalmente, para encontrar las constantes del modelo exponencial de regresión propias para calcular biomasa, se medirá el grado de correlación de las variables obtenidas con los datos de campo, de modo que se pueda hacer la interpolación de la variable dependiente para la totalidad de la zona de estudio.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Caracterización biológica de la zona de estudio

El Jardín Botánico Cedro Rosado es un bosque secundario ubicado en el campus principal de la Universidad del Quindío (Municipio de Armenia, Depto. del Quindío, Colombia), con posición 4°33'N , 75°39'W; comprende, principalmente, vegetación natural intervenida con manchas de bosque secundario y guaduales. De acuerdo con la clasificación ecológica de zonas de vida expuestas por Holdridge [25], el espacio que nos ocupa corresponde a bosque muy húmedo premontano (BMH - PM), cuya superficie aproximada es de 13 Ha y se encuentra a una altitud que oscila entre 1490 y 1530 msnm. Su temperatura promedio asciende a 19,5 °C; su precipitación, a 2436 mm/año; y su humedad relativa varía entre 65-75 %. Posee dos microcuencas que, en conjunto, forman la Quebrada del Cedro Rosado [26]. La diversidad biológica encontrada incluye 64 especies de aves; 53 de hongos macroscópicos; 3 de anfibios; 2 de reptiles; 7 de mamíferos; y 247 de plantas (230 nativas y 17 cultivadas)

1.2 Diseño del plan de vuelo

Esta labor definió la ruta a seguir por la aeronave desde su despegue hasta su aterrizaje. La misión se planificó con el software Map Pilot® instalado en la estación de cómputo terrestre. La línea de vuelo, a su turno, se diseñó sobre las imágenes del área de trabajo importadas desde la aplicación Google Earth®, y para planificarla fueron necesarios tres parámetros: zona de estudio, especificaciones de la cámara y tareas propias del UAV. La información del área de vuelo incluye el ancho y la longitud de la zona de estudio, el ángulo de dirección del lado principal y el traslape deseado en las imágenes, capturadas con 60 % de recubrimiento longitudinal y 30 % transversal. Se empleó la cámara Survey 2 fue empleada para registrar longitudes de onda del infrarrojo cercano en la vegetación, con una resolución espectral de 760 a 840 nm, y una resolución radiométrica de 24 bits; y con la cámara Phantom 3 Advanced se registraron los valores de RGB con una resolución radiométrica de 8 - 10 bits [27]. Las tareas del UAV son las acciones que el sensor tiene que realizar una vez llega a cada punto de captura de la imagen; aquí se incluyen el número de fotos y el tiempo de permanencia en cada punto. Ingresadas estas variables y la altura del vuelo, el aplicativo estableció de forma automática la ruta autónoma de vuelo y estimó su duración de acuerdo con el número total de imágenes planificadas.

1.3 Vuelo UAV y adquisición de imágenes

Una vez diseñada la misión de vuelo, se cargó la ruta en la plataforma Map Pilot. Luego, se realizó el montaje de las cámaras al vehículo que registraron información

de manera simultánea: una registraría radiación visible en el sensor RGB; mientras que la otra poseía un filtro que reflejaba la luz del infrarrojo cercano en el canal azul del sensor RGB. Mediante el transmisor de radiocontrol se ejecutó el lanzamiento de la aeronave activando la ruta de vuelo trazada para que el vehículo llegara hasta el punto de inicio de la primera fotografía y se desplazara por las líneas de vuelo hasta cubrir por completo la zona estudiada.

1.4 Procesamiento de restitución para compactación del ortomosaico

Para iniciar el procedimiento de restitución por coincidencia espacial entre elementos de cada imagen se utilizó el *software* especializado Agisoft PhotoScan Pro®. A través de esa herramienta se alienaron imágenes para identificar puntos coincidentes entre ellas, de tal suerte que se compuso una nube de puntos para definir el modelo; y luego se definieron los puntos de control terrestre pertenecientes a la red topográfica de alta precisión que se encuentra en el campus de la universidad, a fin de georreferenciar el ortomosaico.

1.5 Preprocesamiento digital de imágenes

El modelo de procesamiento digital de la imagen exige dos tareas fundamentales para obtener reflectancias corregidas, esto es, las calibraciones radiométrica y atmosférica. Los procedimientos de calibración radiométrica aplicados a la imagen tienen en cuenta los errores que afectan el valor del brillo de cada pixel de la escena debido a dos fenómenos fundamentales: el error del detector del sistema sensor y el de atenuación ambiental [28]. El sistema MAPIR contiene un aditamento especial con tres objetivos, de los cuales se conoce su curva de reflectancia. Antes del vuelo se toman fotografías con cada cámara al conjunto de blancos que se usarán para calibrar los valores de los pixeles en el *software* de posprocesamiento; ello permite mejorar el nivel de normalización de las mediciones y capturar imágenes en días de poca claridad [29]. La calibración aplica los modelos señalados en las ecuaciones (1) y (2).

$$L_{\lambda} = Gain \cdot ND + Bias \quad (1)$$

Donde:

- L_{λ} : radiancia espectral en la apertura del sensor.
- ND: valor crudo del pixel.
- Gain y Bias son las constantes de calibración de la cámara.

$$R_T(\theta_z) = \frac{DN_T(t)}{DN_R(t)} R_{BaSO_4} \left(\frac{0^\circ}{\theta_z} \right) \quad (2)$$

Donde:

- R_T : factor de reflectancia de un objetivo desconocido.
- θ_z : ángulo cenital solar en cualquier tiempo t medido con el radiómetro.
- $DN_T(t)$: matriz digital producida por el UAV cuando el instrumento visa el objetivo.
- $DN_R(t)$: matriz digital del panel de referencia blanco cuando la cámara está visando al panel de referencia entre los tiempos t_0 y t_1 .
- $R_{BaSO_4} [0^\circ/\theta_z]$: factor de reflectancia del panel $BaSO_4$ con ángulo 0° y ángulo cenital solar de θ_z .

La interacción de la radiación electromagnética con las partículas de agua y polvo que se pueden encontrar entre el sensor de la cámara y el dosel causan perturbaciones en las señales captadas, debido a que actúan como medio absorbente y dispersante de la señal. La corrección atmosférica, que es la eliminación de estas alteraciones, constituye uno de los factores de más influencia al estimar con precisión los índices de vegetación.

Luego de realizar las calibraciones radiométrica y atmosférica se obtienen los valores de reflectancias necesarios para calcular los índices de vegetación NDVI, EVI y SAVI, señalados en las ecuaciones (3), (4) y (5).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (3)$$

Donde:

ρ_{NIR} : radiancia en unidades de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.

ρ_{red} : radiancia en unidades de reflectancia en la banda del rojo.

$$EVI = G \cdot \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \rho_{red} - C_2 \rho_{blue} + L} \quad (4)$$

Donde:

- ρ : reflectancia atmosféricamente corregida en el NIR, regiones espectrales rojo y azul. $C_1=6,0$ y $C_2=7,5$: coeficientes de resistencia atmosférica.

- $L=1,0$: corrección al efecto del fondo del follaje.
- $G=2,5$: factor de ganancia.

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red} + L} \cdot (1 + L) \quad (5)$$

Donde:

- ρ_{NIR} : reflectancia atmosféricamente corregida en la banda del infrarrojo cercano.
- ρ_{red} : reflectancia atmosféricamente corregida en la banda del rojo.
- $L=0,5$: constante de compensación promedio.

El cálculo de estos índices de vegetación mediante sensores instalados en UAV se ha convertido en una alternativa *costo-efectiva* más flexible y precisa que el procesamiento de imágenes satelitales [12] [30], además de facilitar la realización de un monitoreo periódico del área de estudio [31].

1.6 Clasificación de imagen basada en objetos (*object-based image analysis, OBIA*)

A través de este modelo se pretende superar los problemas de clasificación basada en píxeles mediante la definición de segmentos, permitiendo que la variabilidad de la reflectancia espectral se use como atributo para discriminar las características de la segmentación. Se realiza esta clasificación OBIA a fin de obtener el reconocimiento de patrones que permitan discriminar las distintas especies vegetales en la zona de estudio.

OBIA se ha usado durante la última década para definir patrones específicos en una imagen. Esta tecnología se orienta hacia la identificación de objetos a través de la información espectral, las formas geométricas, el análisis de vecindad, la textura y el tono de la imagen; y supera la clasificación basada en píxeles debido a que esta última no tiene en cuenta la forma, textura y estructura, clasificadores de baja eficiencia en el reconocimiento de patrones [32].

1.7 Mediciones *in situ* de variables arbóreas

Una vez hecha la clasificación, se harán mediciones *in situ* de especies para cuantificar los almacenamientos de carbono en las parcelas seleccionadas a través de la ecuación (6), mediante la medición de variables arbóreas como altura y diámetro a la altura del pecho (DAP). La densidad de la madera (ρ) se tomará de la base de datos reportada por Zanne *et al.* [33], en la cual se encuentran las especies arbóreas identificadas en la zona de estudio, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Densidad de la madera de las especies arbóreas encontradas en el Sendero Cedro Rosado

Familia	Nombre científico	Densidad madera (g/c ³) masa secada en horno/ volumen fresco	Región
Fabaceae	<i>Bauhinia variegata</i>	0,606	Sureste de Asia (tropical)
Malvaceae	<i>Heliocarpus americanus</i>	0,200	América del Sur (tropical)
Urticaceae	<i>Cecropia peltata</i>	0,310	América del Sur (tropical)
Juglandaceae	<i>Juglans neotropica</i>	0,490	América del Sur (tropical)
Myrtaceae	<i>Syzygium jambos</i>	0,700	América del Sur (tropical)
Myrtaceae	<i>Psidium guajava</i>	0,629	América del Sur (tropical)
Sapindaceae	<i>Cupania Americana</i>	0,730	América del Sur (tropical)

Fuente: Adaptación de [33].

Para aplicar el modelo alométrico referido en la ecuación 6 se usarán las constantes B1 reportadas en el *Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - Carbono en Colombia* [34]: allí se establece que para la zona de vida “bosque muy húmedo premontano” (BMH-PM) se puede utilizar la ecuación (6) asociada a ella: B1 = 0,932 y a = -2,289.

$$\ln BA = \alpha + B_1 \cdot \ln (D^2 \cdot H \cdot \rho) \quad (6)$$

Donde:

- BA: biomasa aérea en kg.
- D: diámetro a la altura del pecho medido a 1,30 m de altura sobre el suelo (cm).
- H: altura total del árbol (cm).
- ρ : densidad de la madera (g/cm³).

Para las especies como el Otobo (*Otobo lehmannii*) y Guama (*Inga densiflora*), de las cuales no se encuentra información de la densidad de la madera en las bases de datos, se usará el promedio del nivel taxonómico superior (familia) [34].

1.8 Obtención de variables biofísicas

Una vez diseñados los transectos, se realizará el recorrido con el instrumento óptico Trac, que registrará la transmisión de luz directa a una frecuencia alta (32 Hz) a través del dosel como insumo fundamental para calcular la fracción de hueco (*gap fraction* $P_0(\Theta)$), lo que definirá las variables biofísicas LAI [35] y Fapar [36] a través de las ecuaciones (7), (8) y (9).

$$LAI = \int_0^H l(h) \cdot dh \quad (7)$$

Donde:

- $l(h)$: densidad de área a la altura del dosel.

$$fAPAR_{Day}^{Black\ Sky} = \frac{\int_{sunset}^{sunrise} \cos(\theta) \cdot (1 - P_o(\theta)) \cdot d\theta}{\int_{sunset}^{sunrise} \cos(\theta) \cdot d\theta} \quad (8)$$

$$fAPAR^{White\ Sky} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{2\pi}{2}} (1 - P_o(\theta)) \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta d\theta \cdot d\varphi = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - P_o(\theta)) \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta d\theta \quad (9)$$

Donde:

- $P_o(\theta)$: fracción de hueco (*gap fraction*).

Existen diversos instrumentos que permiten capturar estas variables en campo, entre los cuales se encuentran el LAI-2200C Plant Canopy Analyzer, el cleptómetro, Trac y cámaras equipadas con lentes de tipo “ojo de pescado” (*fisheye*) que capturan fotografías hemisféricas. Tanto estas últimas como el LAI-2200C dependen de un cielo uniforme y cubierto ya que, cuando las hojas se encuentran muy iluminadas por el Sol, se producen efectos difíciles de medir. El cleptómetro trabaja bajo condiciones de cielo despejado y utiliza sensores para estimar la luz promedio bajo el dosel [37]; se ha encontrado que estos instrumentos ópticos tienden a subestimar el LAI de bosques donde la distribución de los elementos del follaje no es aleatoria.

Para minimizar la incidencia de estos efectos en la medición de las variables de campo, en la segunda fase de este trabajo se utilizará el mencionado Trac, instrumento óptico desarrollado por [24] y empleado para medir el LAI y la Fapar absorbida por la copa de los árboles. Esta tecnología utiliza la información de la “fracción de hueco” (*gap size*) del dosel para proporcionar un índice de aglomeración del follaje que cuantifica el efecto de distribución espacial no aleatoria del follaje. Tales elementos conducen a la definición de la arquitectura del dosel a través del modelo de Poisson [38].

1.9 Modelación estadística

Con esta se pretende medir el grado de relación entre las variables biofísicas relacionadas, los índices de vegetación y los datos híbridos de campo. Así mismo, se busca detectar el comportamiento de conglomerados de las variables a través del índice de Moran —ecuación (10)— estadístico, que mide la autocorrelación espacial a través

de la identificación de clases de distinta homogeneidad de la muestra; su objetivo es evaluar si el patrón se encuentra agrupado, disperso, o aleatorio.

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \cdot w_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot (Z(s_i) - \bar{Z}) \cdot (Z(s_j) - \bar{Z})}{\sum_{i=1}^n (Z(s_i) - \bar{Z})^2} \tag{10}$$

Donde:

- $Z(s_i), \dots, (Z(s_n))$: variables medidas en las n áreas.

Al medir el grado de relación entre las variables se tendrá la representación gráfica de la correlación a través de diagramas de dispersión, así como la relación que presenta cada una de las variables calculando su correlación cruzada, la correlación de Pearson y la bondad del ajuste a partir del coeficiente de determinación R^2 . Esto definirá los parámetros necesarios para hallar las constantes del modelo exponencial de regresión, de modo que se pueda hacer la interpolación de la variable dependiente (biomasa) para la totalidad de la imagen.

En este trabajo se aplicó la primera parte de la metodología: esto es, captura y procesamiento de las imágenes, cálculo de los índices de vegetación y OBIA, como se muestra en la figura 1.

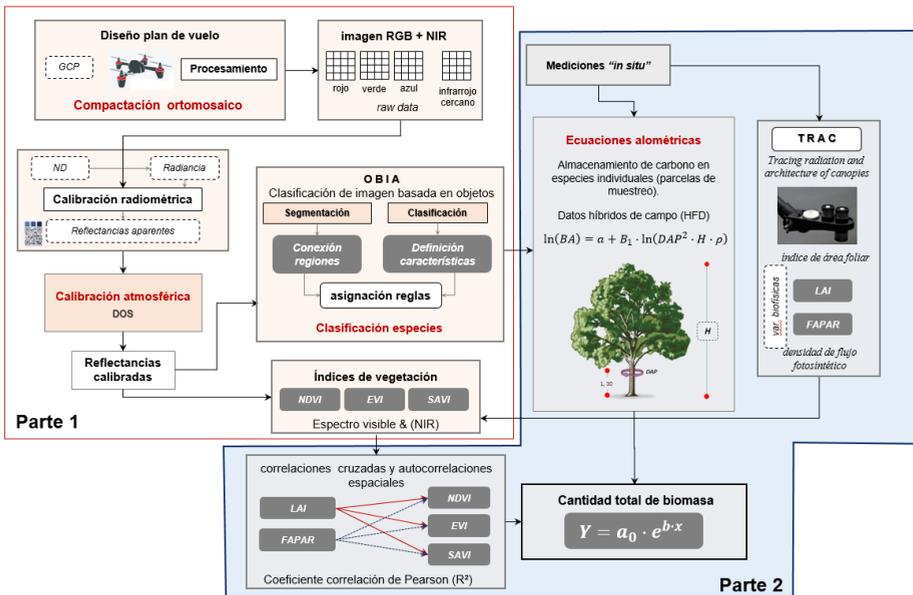


Figura 1. Metodología aplicada

Fuente: elaboración propia.

2. RESULTADOS

2.1 Vuelo UAV y adquisición de imágenes

Se realizaron tres vuelos para garantizar cobertura y autonomía de vuelo, a partir de los cuales se capturaron 326 fotografías a una altura de 90 m, con traslapes mínimos longitudinal de 80 % y transversal de 60 %. La duración de los vuelos osciló entre 8 y 14 minutos, y se cubrieron cerca de 38 Ha en total (tabla 2 y figura 3).

Tabla 2. Parámetros de realización de itinerarios de vuelo.

Parámetro	Itinerario 1	Itinerario 2	Itinerario 3
Área de cobertura	14.47 hectáreas	15.46 hectáreas	8.2 hectáreas
Altura de vuelo	90 m	90 m	90 m
Distancia recorrida	5,09 km	4,96 km	3,14 km
Velocidad	7 m/s	7 m/s	7 m/s
Cantidad de baterías	1	1	1
Duración del recorrido	13 m, 30s	13 m, 13 s	8 m, 56 s
Numero de imágenes	121	130	75
Espacio necesario en memoria SD	0,60 GB	0,65 GB	0,37 GB
Resolución	3,9 cm/ pixel	3,9 cm/ pixel	3,9 cm/ pixel

Fuente: elaboración propia.

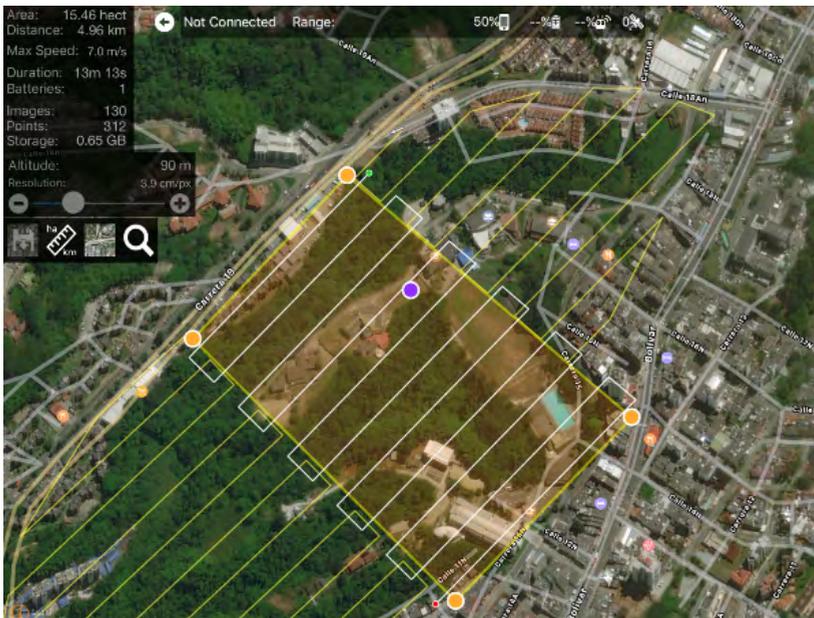


Figura 2. Itinerario de vuelo 2, Interfaz de parámetros Map Pilot for DJ®

Fuente: elaboración propia.

Antes de efectuarse los vuelos se realizaron tomas con la cámara NIR al *target* de calibración suministrado por el fabricante. Estas proporcionan parámetros de reflectancia conocidos y estandarizados para los colores y materiales en los que se encuentra fabricado dicho *target*, y son necesarios en el proceso de calibración de la ortofoto NIR.

2.2 Procesamiento de restitución para compactación del ortomosaico

Para la construcción de los ortomosaicos se empleó el *software* Agisoft Photoscan®, aplicación especializada que extrae información tridimensional de las fotografías aéreas, al tiempo que permite la elaboración de ortofotos georreferenciadas mediante la identificación y relacionamiento de características similares (homólogas) entre imágenes en áreas comunes o de traslape [39]. Para la orientación exterior del ortomosaico se utilizaron los puntos de control terrestre pertenecientes al campus de la Universidad del Quindío, de los cuales se estableció su posicionamiento con instrumental topográfico de alta precisión como marco de referencia para trabajos cartográficos y fotogramétricos. Este proceso se ilustra en la figura 3: el color indica el error en Z; el tamaño y la forma de la elipse representan el error en XY; y las posiciones estimadas de los puntos de control se indican con puntos negros.

Sumado a lo anterior, se realizó el modelo digital de elevaciones (MDE) presentado en la figura 4 con la información de la nube densa de puntos obtenida de las imágenes. Este tiene una resolución de 3,89 cm/pixel y una densidad de puntos de 662 puntos/m². Con la nube de puntos y el MDE se generó el ortomosaico RGB con una resolución de 3 cm/pixel; y se exportó en formatos TIFF y JPG para su posterior procesamiento digital (figura 5).

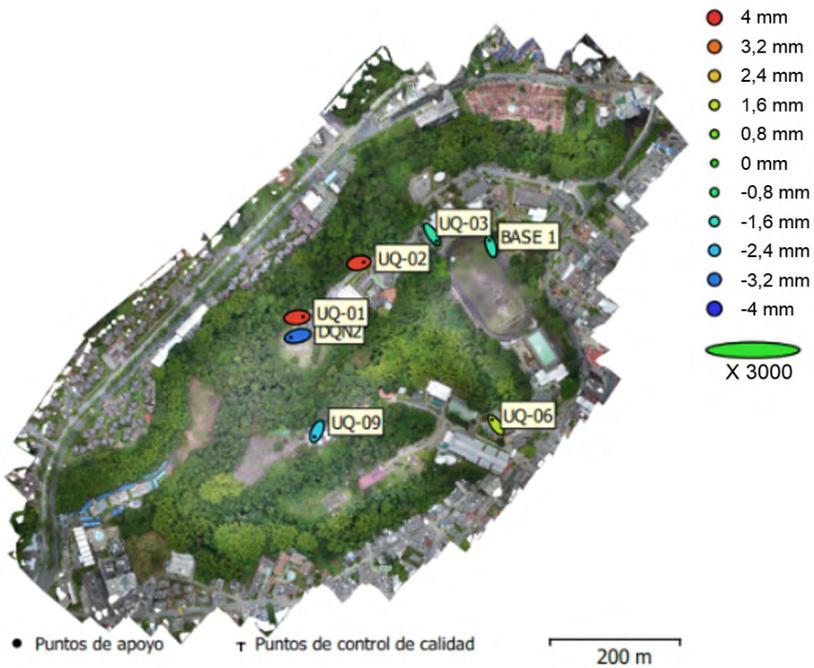


Figura 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores, software Agisoft Photoscan®

Fuente: elaboración propia.

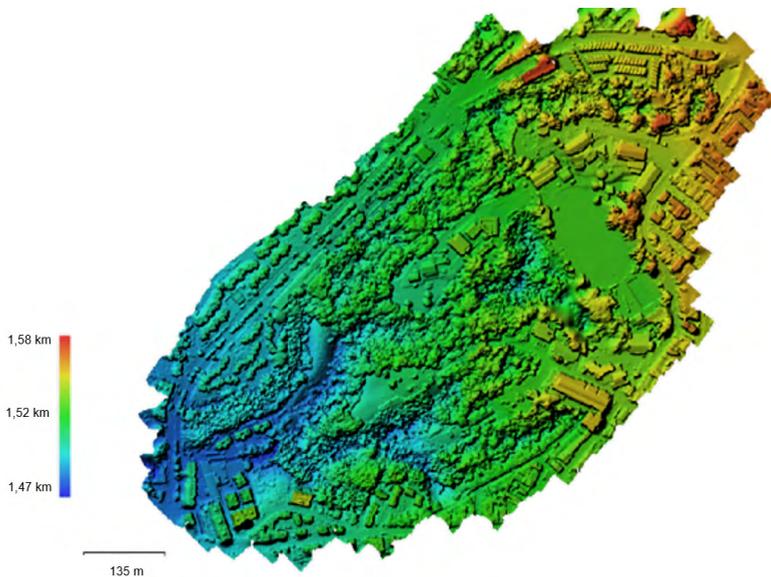


Figura 4. Modelo Digital de Elevaciones Zona de estudio, software Agisoft Photoscan®

Fuente: elaboración propia.



Figura 5. Ortofotografía RGB de la zona de estudio, *software* ArcGIS 10.4.1

Fuente: elaboración propia.

El ortomosaico NIR, representado en la figura 6, contiene valores de reflectancia en dos longitudes de onda —infrarrojo cercano a 850 nm y luz roja a 660 nm—, los cuales fueron calibrados con la curva de reflectancia de los objetivos de calibración propios del sistema Mapir.

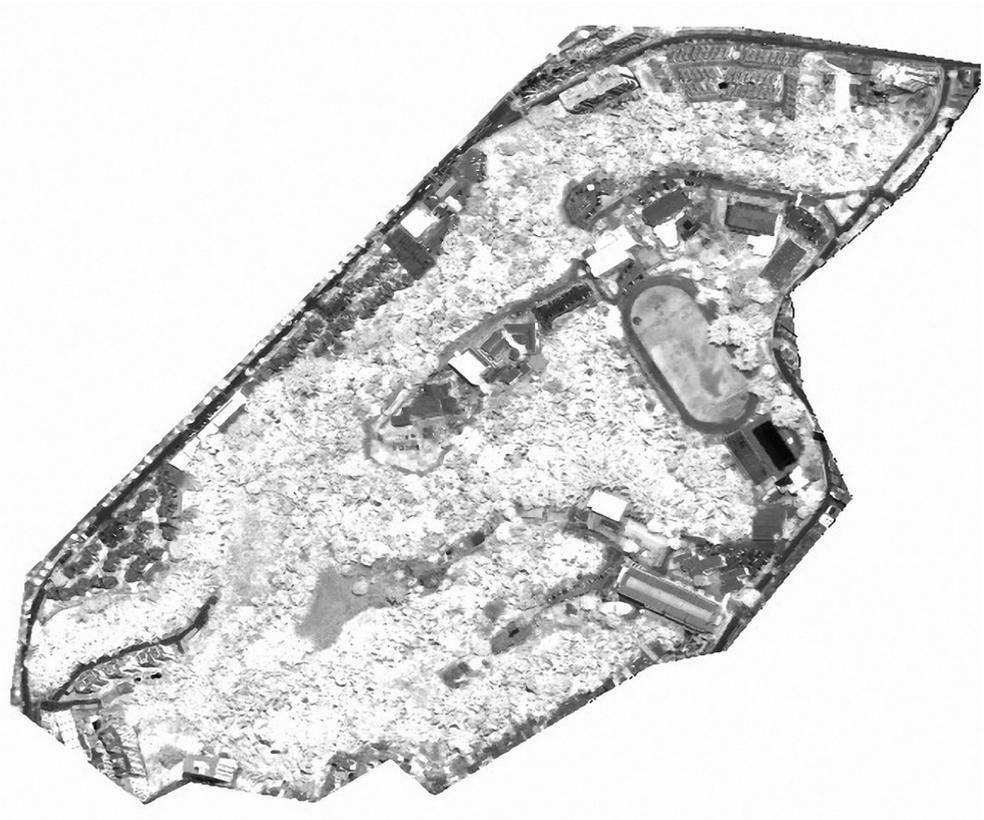


Figura 6. Ortofotografía NIR de la zona de estudio, *software* QGIS 2.18

Fuente: elaboración propia.

2.3 Estimación de los índices de vegetación

Una vez calibradas las reflectancias de las imágenes, se realizó el cálculo de los índices de vegetación NDVI, EVI y SAVI con el *software* QGIS 2.18. Los valores obtenidos en el NDVI se presentan en la figura 7. Se pudo observar que permite la diferenciación entre diferentes tipos de coberturas del suelo; no obstante, los valores obtenidos dentro del relicto boscoso son muy similares entre especies, lo que no permite realizar una diferenciación basada en estos índices.

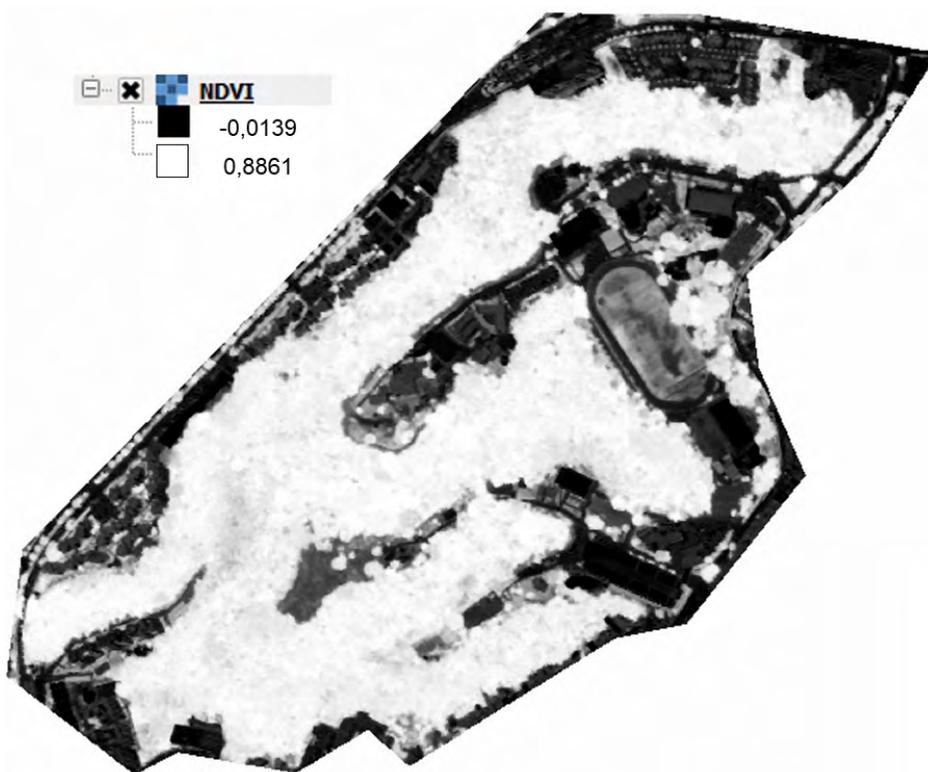


Figura 7. Estimación del NDVI de la zona de estudio, *software* QGIS 2.18

Fuente: elaboración propia.

2.4 Clasificación de imagen basada en objetos (OBIA)

El primer paso del proceso de clasificación correspondió a la segmentación de la imagen. En el desarrollo de dicha labor se dio un peso superior a la reflectancia banda infrarroja, con lo cual se buscaba un mayor nivel de diferenciación debido a los atributos espectrales de la vegetación. Para llevar a cabo la clasificación, y con la colaboración del personal del Jardín Botánico, se llevó a cabo el entrenamiento que dio lugar a las siguientes clases: agua, arbustos, asbesto, asfalto, bosque mixto, caracolí, carbonero, casco de buey, caucho, cedro negro, cedro rosado, construcciones, guadual, gualanday, guayabo, mestizo, otopo, pasto, pavimento, suelo desnudo, vehículos y yarumo. Una vez seleccionadas las muestras de cada una de las clases —para lo cual se empleó el *software* eCognition® 9.0.1—, se realizó la OBIA de la imagen total, como se observa en la figura 8.

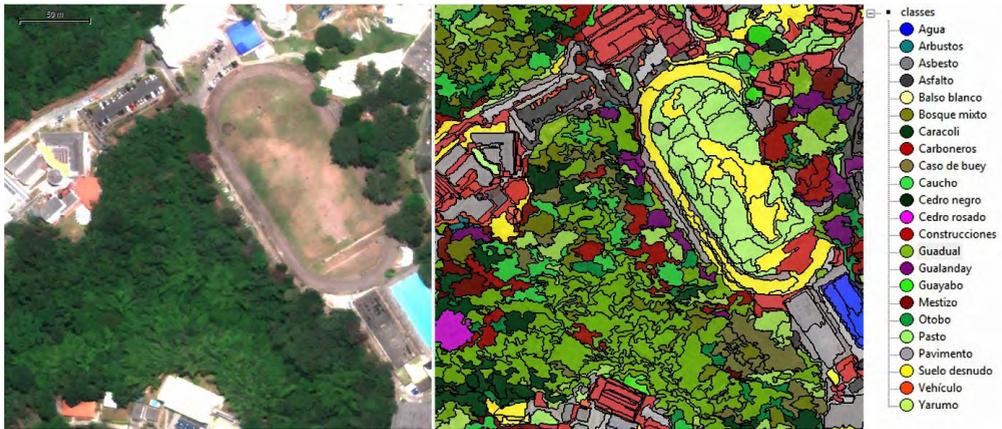


Figura 8. OBIA con 22 clases identificadas, *software eCognition® 9.0.1*

Fuente: elaboración propia.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta fase del trabajo se obtuvieron dos imágenes, una en el espectro visible y otra en el infrarrojo cercano empelando un VANT, con las que se calcularon los índices de vegetación NDVI, EVI y SAVI. Estos no posibilitaron una disgregación entre tipos de vegetación, dada su similitud en coberturas boscosas; sin embargo, mediante la técnica OBIA, y a través del algoritmo multirresolución para definir la segmentación, se dio peso doble a los valores de reflectancia del infrarrojo cercano sobre las reflectancias de las otras bandas, con lo que se logró detectar diferentes especies. De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye que, mediante el procesamiento digital de las imágenes obtenidas a través de sensores instalados en VANT, se pueden calcular diferentes índices de vegetación. Así mismo, la alta resolución obtenida (3 cm/pixel) hizo posible realizar una clasificación OBIA de relictos boscosos urbanos, con la que se consiguió una diferenciación ente tipos de vegetación y especies arbóreas; esto último no sería posible si se emplearan imágenes satelitales de resoluciones gruesas, dado que no bastan para discriminar entre especies.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos constituyen un punto de partida importante para caracterizar relictos boscosos mediante el uso de sensores remotos, hecho que propone una metodología novedosa de estimación de variables forestales. El uso de técnicas de observación de la tierra en la estimación de biomasa arbórea disminuye costos en tiempo y dinero sin implicaciones destructivas del ecosistema; sin embargo, las mediciones de campo son necesarias para calibrar los modelos generados. Las variables derivadas NDVI, EVI,

SAVI obtuvieron valores con alto grado de similitud y no se logró discriminación de especies a través de estos índices. Como alternativa efectiva se utilizó la clasificación por objetos OBIA, dentro de la cual se asignó peso doble a la banda infrarroja y, en combinación con el algoritmo de segmentación multiresolución, se obtuvo la disgregación de especies o agrupaciones de especies con características similares. Los índices NDVI, EVI, y SAVI derivados a partir de la combinación de bandas multispectrales, capturadas con sistemas VANT, deberán ser objeto de análisis estadístico para hallar su correlación con las características estructurales del ecosistema.

AGRADECIMIENTOS

Al topógrafo Jonnathan Castillo por su valiosa colaboración y continua asesoría. Al Centro de Investigaciones en Biodiversidad de la Universidad del Quindío (Cibuq) y la Oficina de Planeación y Desarrollo de la misma entidad, por la información suministrada para la caracterización de la zona de estudio

REFERENCIAS

- [1] A. Vásquez y H. Arellano, “Estructura, Biomasa aérea y carbono almacenado en los bosques del Sur y Noroccidente de Córdoba”, en *Colombia Diversidad Biótica XII: La Región Caribe de Colombia*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2012, pp. 923-962.
- [2] T. Y. Simegn, T. Soromessa y E. Bayable, “Forest Carbon Stocks in Lowland Area of Simien Mountains National Park: Implication for Climate Change Mitigation”, *Science, Technology and Arts Research Journal*, vol. 3, n.º 3, pp. 29-36, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/star.v3i3.5>
- [3] P. Vicharnakorn, R. P. Shrestha, M. Nagai, A. P. Salam y S. Kiratiprayoon, “Carbon Stock Assessment Using Remote Sensing and Forest Inventory Data in Savannakhet, Lao PDR”, *Remote Sensing*, vol. 6, n.º 6, pp. 5452-5479, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs6065452>
- [4] S. M. Raciti, L. R. Hutyra y J. D. D. Newell, “Mapping carbon storage in urban trees with multi-source remote sensing data: Relationships between biomass, land use, and demographics in Boston neighborhoods”, *Science of the Total Environment*, vol. 1, pp. 72-83, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.070>
- [5] F. Maselli, F. P. Vaccari, M. Chiesi, S. Romanelli y L. P. D’Acqui, “Modelling and analyzing the water and carbon dynamics of Mediterranean macchia by the use of ground and remote sensing data”, *Ecological Modelling*, vol. 351, pp. 1-13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.02.012>
- [6] IPCC, “Forest Land”, *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, vol. 4, 2006.

- [7] D. Lu, “The Potential and Challenge of Remote Sensing-based Biomass Estimation”, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, n.º 7, pp. 1297-1328, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160500486732>
- [8] G. Galindo García, E. Cabrera Montenegro, D. M. Vargas Galvis, H. R. Pabón Méndez, K. R. Cabrera Torres, A. P. Yepes Quintero, J. F. Phillips Bernal, D. A. Navarrete Encinales, Á. J. Duque Montoya, M. C. García Dávila y M. F. Ordóñez Castro, *Estimación de la biomasa aérea usando datos de campo e información de sensores remotos*, Bogotá: Ideam, 2011.
- [9] M. Segura, M. Kanninen y D. Suárez, “Allometric Models for Estimating Aboveground Biomass of Shade Trees and Coffee Bushes Grown Together”, *Agroforestry Systems*, vol. 68, n.º 2, pp. 143-150, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-006-9005-x>
- [10] J. Chave, C. Andalo, S. Brown, M. A. Cairns, J. Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromard, H. N., T. Kira, J. P. Lescure, B. W. Nelson, H. Ogawa, H. Puig, B. Riéra y T. Yamakura, “Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests”, *Oecologia*, vol. 145, pp. 87-99, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- [11] A. Valerio, M. Herold, H. Matieu y C. Schmullius, “Mapping Biomass with Remote Sensing: A Comparison of Methods for the Case Study of Uganda”, *Carbon Balance and Management*, vol. 6, n.º 1, p. 7, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1186/1750-0680-6-7>
- [12] S. K. von Bueren, A. Burkart, A. Hueni, U. Rascher, M. P. Tuohy y I. J. Yule, “Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations”, *Biogeosciences*, vol. 12, pp. 163-175, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-12-163-2015>
- [13] N. Yastikli, I. Bageci y C. Beser, “The Processing of Image Data Collected by Light UAV Systems for GIS Data Capture and Updating”, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-7/W2 (noviembre), pp. 267-70, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W2-267-2013>
- [14] J. Torres-Sánchez, F. López-Granados, A. I. De Castro y J. M. Peña-Barragán, “Configuration and Specifications of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Early Site Specific Weed Management”, *PLoS ONE*, vol. 8, n.º 3, p. e5821, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0058210>
- [15] F. Remondino, L. Barazzetti, F. Nex, M. Scaioni y D. Sarazzi, “Uav Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling – Current Status and Future Perspectives”, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII(1/C22), pp. 25-31, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011>
- [16] J. P. Dandois y E. C. Ellis, “High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 136, pp. 259-276, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.005>
- [17] C. Song y C. E. Woodcock, “Monitoring forest succession with multitemporal Landsat images: factors of uncertainty”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, n.º 11, pp. 2557-2567, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.818367>

- [18] E. Honkavaara, R. Arbiol, L. Markelin, L. Martinez, M. Cramer, S. Bovet, L. Chandelier, R. Ilves, S. Klonus, P. Marshal, D. Schlöpfer, M. Tabor, C. Thom y N. Veje, “Digital Airborne Photogrammetry—A New Tool for Quantitative Remote Sensing?—A State-of-the-Art Review On Radiometric Aspects of Digital Photogrammetric Images”, *Remote Sensing*, vol. 1, n.º 3, pp. 577-605, 2009. <https://doi.org/10.3390/rs1030577>
- [19] A. Agapiou, D. G. Hadjimitsis, C. Papoutsas, D. D. Alexakis y G. Papadavid, “The Importance of Accounting for Atmospheric Effects in the Application of NDVI and Interpretation of Satellite Imagery Supporting Archaeological Research: The Case Studies of Palaepaphos and Nea Paphos Sites in Cyprus.”, *Remote Sensing*, vol. 3, n.º 12, pp. 2605-2629, 2011. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs3122605>
- [20] M. A. Homem Antunes, J. M. Gleriani y P. Debiasi, “Atmospheric Effects on Vegetation Indices of Tm and Etm + Images From a Tropical Region Using the 6S Model”, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 6549-6552, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6352099>
- [21] M.-L. Smith, J. Anderson y M. Fladeland, “Forest canopy structural properties Chapter 14”, en *Field Measurements for Forest Carbon Monitoring: A Landscape-Scale Approach*, Coeli M. Hoover, Ed., Nueva York: Springer Science, Business Media, 2008, pp. 179-196.
- [22] P. V. Bolstad y S. T. Gower, “Estimation of Leaf Area Index in Fourteen Southern Wisconsin Forest Stands Using a Portable Radiometer”, *Tree Physiology*, vol. 7, pp. 115-124, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/7.1-2-3-4.115>
- [23] M. Sprintsin, S. Cohen, K. Maseyk, E. Rotemberg, J. Grünzweig, A. Karnieli, P. Berliner y D. Yakir, “Long term and seasonal courses of leaf area index in a semi-arid forest plantation”, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 151, pp. 565-574, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.01.001>
- [24] J. M. Chen y J. Cihlar, “Plant Canopy Gap-Size Analysis Theory for Improving Optical Measurements of Leaf-Area Index”, *Applied Optics*, vol. 32, n.º 27, p. 6211, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.34.006211>
- [25] L. R. Holdridge, *Ecología basada en zonas de vida*, Costa Rica: Agroamérica, 1987.
- [26] J. Acevedo, S. Acosta Arrubla, S. Aranzales, R. d. M. Bedoya, M. J. García, O. A. Jojoa, A. Osorio y S. Vázquez, *Plan de Manejo Ambiental para el Jardín Botánico de la Universidad del Quindío*, Armenia: 2014.
- [27] O. E. Peláez Martínez, *Análisis de la respuesta espectral de las coberturas vegetales de los ecosistemas de páramos y humedales a partir de los sensores aerotransportados Utracam D, DJI Phantom 3 Pro y MAPIR NIR. Caso de estudio Humedal “El Ocho”, Villamaría - Caldas*, tesis de maestría, Universidad Católica de Manizales, 2017.
- [28] N. Sánchez Martín, B. Arias Pérez, D. González Aguilera y J. Gómez Lahoz, “Análisis aplicado de métodos de calibración de cámaras para usos fotogramétricos”, en *VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía TOPCART 2004*, 2004.

- [29] Mapir, *Camera Reflectance Calibration Ground Target Package*, San Diego: Mapir, 2017, pp. 1-2.
- [30] J. Tian, L. Wang, X. Li, H. Gong, C. Shi, R. Zhong y X. Liu, “Comparison of UAV and WorldView-2 imagery for mapping leaf area index of mangrove forest”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, n.º 61, pp. 22-31, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.05.002>
- [31] C. A. Rokhmana, “The potential of UAV-based remote sensing for supporting precision agriculture in Indonesia”, *Procedia Environmental Sciences*, n.º 24, pp. 245-253, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.03.032>
- [32] A. Lisita, E. E. Sano y L. Durieux, “Identifying potential areas of Cannabis sativa plantations using object-based image analysis of SPOT-5 satellite data”, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 34, n.º 15, pp. 5409-28, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.790574>
- [33] A. E. Zanne, G. Lopez-Gonzalez, D. A. Coomes, J. Ilic, S. Jansen, S. L. Lewis, R. B. Miller, N. G. Swenson, M. C. Wiemann y J. Chave, “Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. Dryad Digital Repository”, 2009. [en línea]. Disponible en <https://doi.org/10.5061/dryad.234>.
- [34] Ideam, *Protocolo para la estimación nacional y subnacional de Biomasa - Carbono en Colombia*, Bogotá: 2011.
- [35] J. M. Chen y T. A. Black, “Defining Leaf Area Index for Non-Flat Leaves”, *Plan, Cell and Environment*, vol. 15, n.º 4, pp. 421-429, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x>
- [36] GCOS, “Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC”, *World Meteorologica Organization GCOS*, vol. 138, 2010.
- [37] LI-COR (2010, sept.). “LI-COR” [en línea]. Disponible en <https://www.licor.com/documents/jlhuprnmuu6arl10slt8g4nr1nlfuhat>.
- [38] J. W. Chason, D. D. Bladocchi y M. A. Huston, “A Comparison of Direct and Indirect Methods for Estimating Forest Canopy Leaf Area”, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 57, n.º 1-3, pp. 107-128, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(91\)90081-Z](https://doi.org/10.1016/0168-1923(91)90081-Z)
- [39] J. O. Escalante Torrado, J. J. Cáceres Jiménez y H. Porras Díaz, “Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV”, *Revista Tecnura*, vol. 20, n.º 50, pp. 119-140, 2016.