

Comparación de modelos de altura de la vegetación para estimación de biomasa en un bosque de manglar en el Caribe Colombiano

Comparison of vegetation canopy height model for estimating biomass in a mangrove forest in the Colombian Caribbean

Comparação de modelos de altura da vegetação para estimativa de biomassa em um manguezal no Caribe Colombiano

Jose Eduardo Fuentes Delgado

Universidad del Valle, Cali, Colombia. jose.fuentes@correounivalle.edu.co | 0000-0003-1233-4924

Para citar este artículo: Fuentes Delgado, J. (2019). Comparación de modelos de altura de la vegetación para estimación de biomasa en un bosque de manglar en el Caribe Colombiano. *Entorno Geográfico*, (19). <https://doi.org/10.25100/eg.v0i19.9471>

Resumen

Este trabajo integra satélite-LIDAR para comparar la evaluación de stock de carbono en alta resolución en un bosque de manglar (Rincón Mosquito) en la zona costera del mar Caribe. Se comparó la altura de vegetación resultante de la extracción de un modelo de altura de la vegetación satelital EROS-B y un LIDAR aerotransportado vs datos en campo. Los satélites ofrecen una oportunidad de monitorear cambios en el carbono forestal causados por la deforestación y la degradación, igual que nuevos métodos aéreos, especialmente el método LIDAR, ofrecen una forma de estimar la densidad del carbono forestal, lo cual ayuda en el desarrollo de líneas base para inventarios de carbono. Luego de calcular la biomasa total desde los datos de satélite y LIDAR, se comparó la medida de biomasa tomada en campo. En términos de escalas detalladas se puede concluir que el sensor con mayor precisión es el LIDAR al tener un nivel de resolución espacial que permite gran detalle de la masa arbórea., El uso de estéreo pares satelitales es viable en grandes extensiones y no en pequeñas áreas, donde particularmente en los últimos años, los datos tomados con vehículos aéreos no tripulados parecen ser una alternativa más viable en disponibilidad y costo.

Palabras clave: CHM, manglar, LIDAR, biomasa y satélite



Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0.

Abstract

This work integrates satellite-LIDAR to compare the evaluation of high-resolution carbon stock in a mangrove forest (Rincón Mosquito) in the coastal area of the Caribbean Sea. The height of vegetation resulting from the extraction of a height model of the EROS-B satellite vegetation and an airborne LIDAR vs. field data was compared. Satellites offer an opportunity to monitor changes in forest carbon caused by deforestation and degradation, just as new aerial methods, especially the LIDAR method, offer a way to estimate forest carbon density, which helps in the development of lines base for carbon inventories. After calculating the total biomass from the satellite and LIDAR data, the biomass measurement taken in the field was compared. In terms of small scales it can be concluded that the sensor with greater precision is the LIDAR by having a level of spatial resolution that allows great detail of the tree mass., The use of stereo satellite pairs is viable in large areas and not in small areas , where particularly in recent years, data taken with unmanned aerial vehicles seems to be a more viable alternative in availability and cost.

Keywords: CHM, mangrove, LIDAR, biomass and satellite

Resumo

Este trabalho integra dados de satélite e LIDAR para comparar a avaliação do estoque de carbono em alta resolução em um manguezal (Rincón Mosquito) na zona costeira do mar do Caribe. Comparou-se a altura da vegetação resultante da extração de um modelo de altura da vegetação satelital EROS-B e de um LIDAR aerotransportado com dados de campo. Os satélites oferecem uma oportunidade de monitorar as mudanças no carbono florestal causadas pelo desmatamento e pela degradação; da mesma forma, novos métodos aéreos, especialmente o LIDAR, oferecem uma forma de estimar a densidade do carbono florestal, o que auxilia no desenvolvimento de linhas de base para inventários de carbono. Após calcular a biomassa total a partir dos dados de satélite e LIDAR, comparou-se a medida de biomassa obtida em campo. Em termos de escalas detalhadas, pode-se concluir que o sensor de maior precisão é o LIDAR, por possuir um nível de resolução espacial que permite grande detalhamento da massa arbórea. O uso de pares estereoscópicos de satélite é viável em grandes extensões, mas não em áreas pequenas, onde, particularmente nos últimos anos, os

dados obtidos com veículos aéreos não tripulados parecem ser uma alternativa mais viável em termos de disponibilidade e custo.

Palavras-chave: CHM, manguezal, LIDAR, biomassa e satélite

Recibido: 20 de septiembre de 2019

Aceptado: 26 de marzo de 2020

Publicado: 03 de junio de 2020

1. Introducción

Desde la adopción de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC por sus siglas en inglés) y dentro del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (Eggleston et al., 2006) se ha identificado como una prioridad la gestión sostenible de los ‘sumideros’ de carbono en el monitoreo forestal a nivel regional y mundial. A nivel nacional desde el año 2010 se aplica la metodología de reducción de la deforestación y degradación de Bosque (REDD+), Incluida entre las actividades de mitigación de emisiones de gases efecto invernadero (GEI), la deforestación evitada se ha considerado una medida a priorizar en términos de reducir estas emisiones. Las emisiones debidas a la deforestación y al desarrollo de la agricultura corresponden a aproximadamente el 20% del total de emisiones de GEI, siendo la segunda fuente más importante después de la combustión de fósiles (Menon et al., 2007). Colombia por su condición ecuatorial intertropical, es uno de los países más biodiversos del mundo, siendo uno de los puntos focales para el desarrollo de pago por servicios ambientales o servicios ecosistémicos (Fuentes, Varga y Pintó, 2018).

REDD+ es un régimen mundial para mitigar las emisiones de carbono y compensar a los países con bosques tropicales por sus esfuerzos en la conservación, la gestión sostenible de los bosques y el aumento de las reservas forestales de carbono. A pesar de las discusiones y negociaciones sobre el cambio climático para poder continuar, REDD+ fue incluido posterior al 2012 en el tratado internacional de reducción de emisiones debido a su coste-efectividad, eficiencia y enfoque equitativo para la mitigación del cambio climático en todo el mundo.

Colombia se ha venido preparando para capitalizar las oportunidades que se derivarán de REDD+. Actualmente nuestro país viene implementando a través del IDEAM y el MAVDT un fortalecimiento técnico e institucional para generar protocolos, cuantificar y monitorear

la deforestación a nivel nacional y subnacional, así como un protocolo para estimar los contenidos de carbono en la biomasa asociada a dicha deforestación con el fin de preparar una estrategia REDD+ de país, y armonizar el marco de las políticas para los bosques y para el manejo ambiental, incluyendo los temas relacionados con la propiedad del carbono y los mecanismos para compartir los beneficios (García Arbeláez, Barrera, Gómez y Suárez Castaño, 2015). El proveer más detalles de los stocks y emisiones de carbono a escala regional y nacional, usando una combinación de enfoques de inventario de parcelas, mapeo satelital y modelaje de carbono es un objetivo al alcance actual de la tecnología de sensores remotos aplicados en análisis REDD. Así, los sensores ofrecen una oportunidad para monitorear cambios en el carbono del bosque causados por la deforestación y la degradación, pero solo después de evaluar las densidades iniciales de carbono. Tradicionalmente, se han evaluado las densidades de carbono usando parcelas de inventario en campo, que son muy valiosas, pero también costosas, consumen mucho tiempo y están limitadas inherentemente a la representatividad geográfica (Asner, 2009).

En el caso colombiano, se apunta principalmente al fortalecimiento de la capacidad de seguimiento y monitoreo de coberturas forestales y estandarización de líneas base Nivel 1 y 2 para proyectos REDD+. Respecto a las normas que regulan el análisis de Contenidos de Carbono en Bosques Naturales, el país en el año 2017 estableció las directrices iniciales para MRV – Medición Reporte y Verificación en proyectos REDD+. Colombia propone una reducción del 20% de sus emisiones con respecto a un escenario inercial proyectado a 2030 (García et al., 2015). En el mundo se ha trabajado con sensores remotos de alta resolución tipo LIDAR, para la estimación de parámetros forestales con muy buenos resultados, también se han combinado extracción de información a partir de fotografías aéreas, vehículos aéreos no tripulados e imágenes de satélite de alta resolución principalmente para estimar diferenciación de especies arbóreas, y de mediciones forestales con modelos de elevación derivados de fotogrametría (ver Tabla 1).

Tabla 1. Experiencias en el uso de modelos de altura de la vegetación.

Lugar y cobertura	Sensor utilizado	Referencia
Zhangjiang, China (Manglar)	LIDAR y Drone	(Zhu <i>et al.</i> , 2019)
Guangxi, China (Manglar)	LIDAR y Drone	(Yin y Wang, 2019)
Białowieża, Polonia (Bosques)	LIDAR	(Mielcarek <i>et al.</i> , 2018)
Howland Forest, EE. UU (Bosques)	LIDAR, Radar, Satélite	(García <i>et al.</i> , 2018)
Alaska, EE. UU (Bosques)	Satélite	(Meddens <i>et al.</i> , 2018)
Papua, Indonesia (Manglar)	Satélite	(Aslan <i>et al.</i> , 2018)
Harvard Forest, EE. UU (Bosques)	LIDAR	(Sullivan <i>et al.</i> , 2017)
Douala, Camerun (Manglar)	Foto aérea	(Nfotabong <i>et al.</i> , 2013)

Fuente: Elaboración propia

En Colombia, existe el Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación general a Nivel Nacional. Como una Propuesta de uso de Imágenes de Sensores Remotos inicial para dar paso al desarrollo de metodología que exploran las escalas gruesas (10m /1:50.000) y finas (1-5m /1:25.000) a nivel subnacional pero no existe una metodología clara que calcule el volumen de la biomasa aérea con sensores remotos de alta resolución sobre distintas coberturas y especies forestales presentes en el país (Cabrera, 2011). Las iniciativas globales para cuantificación de stocks de carbono se deben analizar de una manera más efectiva y menos costosa teniendo en cuenta la capacidad económica y práctica dentro de los proyectos que monitoreen parámetros básicos en las zonas boscosas, generalmente con pocos recursos disponibles para proyectos locales e insuficientes para niveles nacionales.

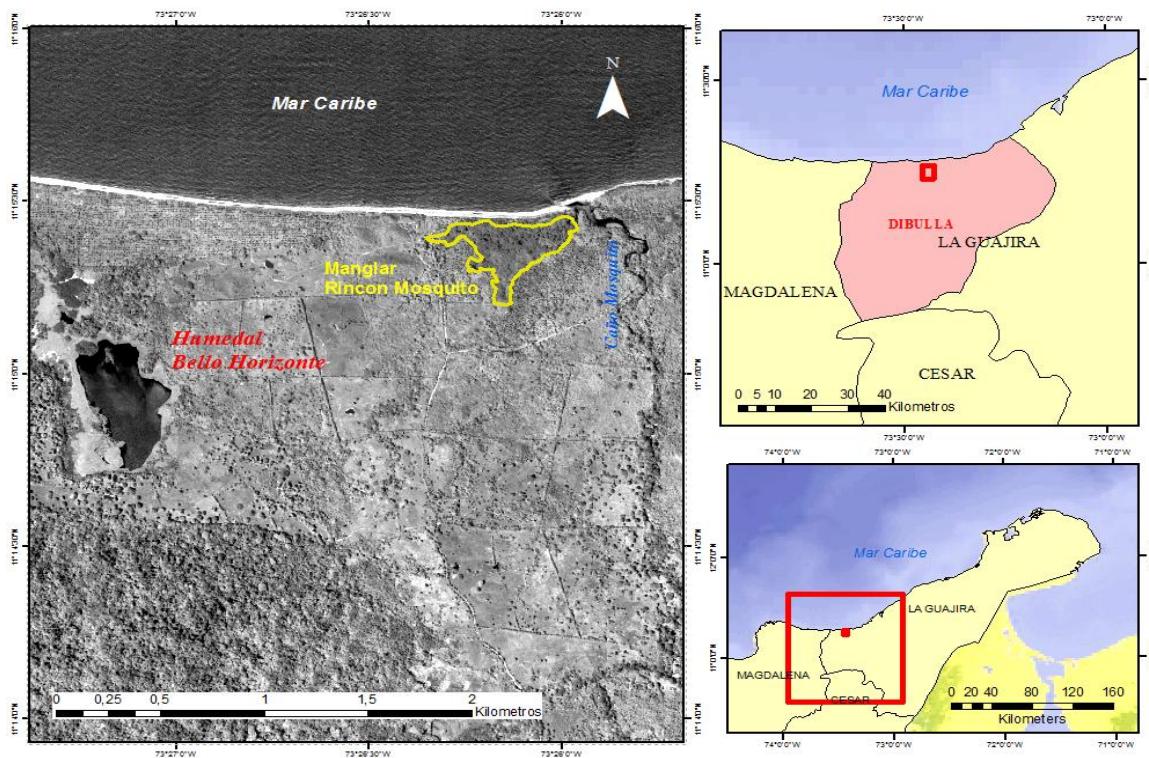
El objetivo de este estudio es comparar la altura de vegetación resultante de la extracción de un modelo de superficie satelital de alta resolución EROS-B y un modelo de superficie LIDAR aerotransportado vs parcelas en campo, aplicando una ecuación alométrica para estimación de la biomasa aérea en un bosque de manglar en el caribe colombiano. Los principales métodos para estimar biomasa se basan en la obtención de datos de campo, con y sin muestreos destructivos y a partir de conversión de volúmenes a biomasa o por relaciones alométricas, se estiman curvas de biomasa y se infiere el almacenamiento de carbono. Los datos obtenidos por medio de parcelas o inventarios forestales suelen ser insuficientes o muy

costosos para tener estimativos regionales o nacionales, por lo que desde REDD+ se recomienda su complementación con datos obtenidos a través de técnicas de sensores remotos como una alternativa para la estimación indirecta de la biomasa y como un insumo para la estimación de modelos de almacenamiento y flujo de carbono. En la actualidad para estimar la biomasa aérea con sensores remotos en Colombia, no existe una metodología aplicable a escala detallada o en grandes áreas, en cuanto a una relación costo beneficio que contribuya a la cuantificación de contenidos de carbono, como una herramienta de línea base que pueda ser articulada en procesos de reducción de emisiones o captura de carbono con miras a un pago por servicios ambientales o servicios ecosistémicos tipo REDD+.

1.1. Área de estudio

El área de estudio se ubica en el manglar Rincón Mosquito localizado en las cercanías del Caño Mosquito en el municipio de Dibulla, en la Guajira, zona costera del mar Caribe en el extremo nororiental de Colombia (ver Figura 1). Este sitio hace parte del inventario de manglares realizado en el año 2009 por la Corporación Autónoma Regional de la Guajira (CORPOGUAJIRA) y en el año 2011 por parte del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR) dentro del proyecto “Definición de los límites naturales del humedal Bello Horizonte”, el cual cuenta con una superficie aproximada de 12.9 ha, donde predominan dos especies *Laguncularia racemosa* y *Rhizophora mangle*. El humedal Bello Horizonte corresponde en términos climáticos a la zona de vida de bosque seco, caracterizada por presentar una temperatura media superior a 24° C y una precipitación entre 1000 y 2000 mm.

Figura 1. Localización del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia

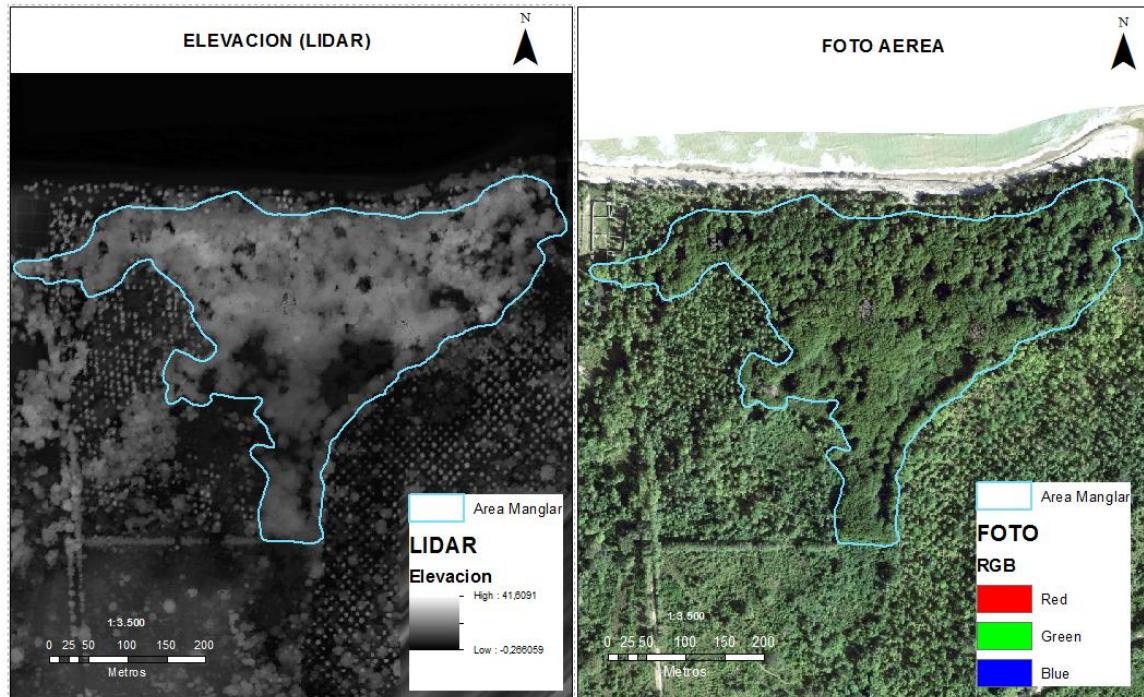
2. Materiales y métodos

2.1. LIDAR aerotransportado

El instrumento LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging por sus siglas en inglés), es un sensor activo aerotransportado el cual utiliza un pulso láser para generar mediciones por retorno de pulsos desde un aeroplano, helicóptero o un vehículo aéreo no tripulado. Es una tecnología de imágenes aéreas que, al igual que la tecnología de fotografía aérea de los años 1970s -1980s, se está expandiendo rápidamente por todo el mundo para su uso en una amplia gama de sectores ambientales. El LIDAR aéreo se usa ampliamente para mapear infraestructura, incluyendo tendidos eléctricos, represas y ciudades, así como terrenos y actividad forestal. (Asner, 2009). El LIDAR, ofrece un medio para estimar el carbono del bosque para grandes áreas (Lefsky et al., 2002b). Por medio del mapeo aéreo se puede ayudar en el desarrollo de las estimaciones de stocks de carbono en bosques tropicales (Brown et al.,

2005). El mapeo aéreo LIDAR incluye la planeación del vuelo, calibración de sensores, adquisición de datos, calibración de imágenes post-vuelo y las fases de generación de datos en tres dimensiones (Lefsky et al., 2002b). El LIDAR aéreo cuando se combina con parcelas de validación en campo, puede arrojar mapas de carbono de miles de hectáreas y ofrece la oportunidad de mapear la estructura tridimensional del dosel del bosque en más de 5.000 ha por día, con una resolución espacial de 1,0 m. Para el desarrollo del proyecto se utilizaron los datos tomados por un LIDAR aerotransportado, el 16 de agosto de 2011 generando los archivos de elevación del retorno de LIDAR en formato LAS y fotos aéreas RGB para el área del manglar Rincón Mosquito en el municipio de Dibulla en el departamento de la Guajira (ver Figura 2).

Figura 2. Modelo de superficie LIDAR y Foto área RGB, (manglar Rincón Mosquito La Guajira).

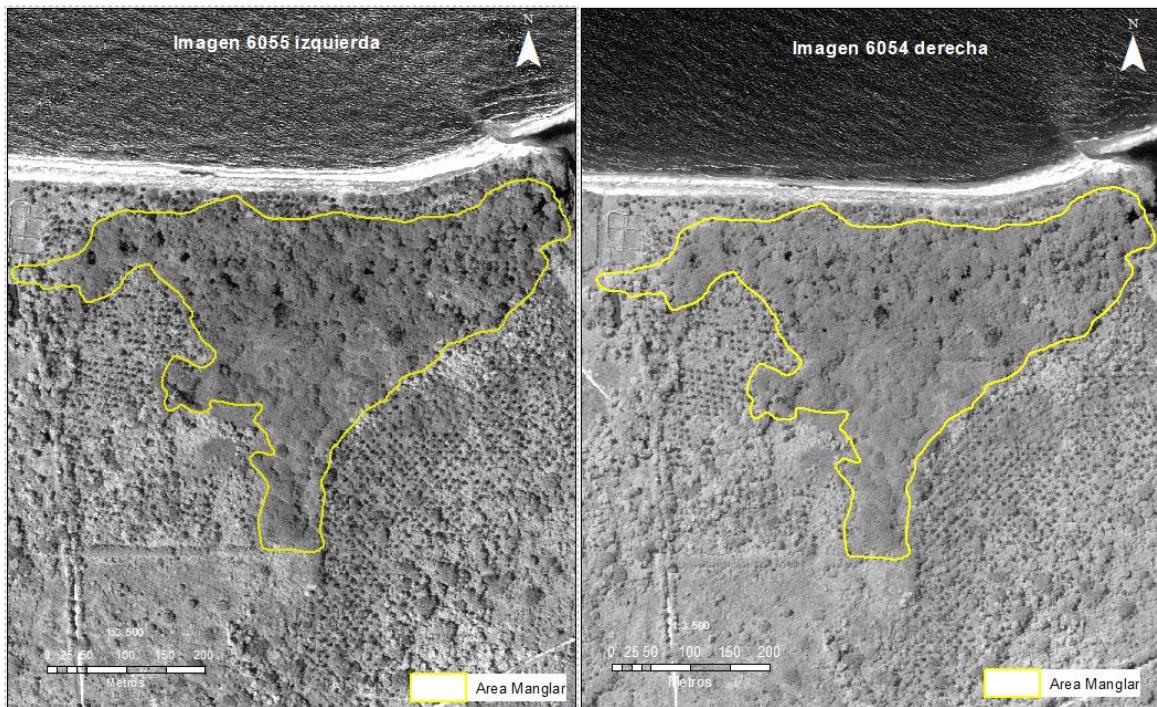


Fuente: Elaboración propia

2.2. Satélite EROS-B

Los dos satélites EROS (Earth Resource Observation Satellites), de reconocimiento de recursos terrestres, son satélites livianos, con órbita de baja altitud (LEO) y de muy alta resolución, diseñados y fabricados por Aircraft Industries (IAI), con una cámara pancromática CCD de alta resolución para maniobrar rápidamente sobre diversos objetivos y obtener un cubrimiento efectivo de las áreas. Los satélites EROS son capaces de producir pares estéreo, así como múltiples imágenes de la misma zona sobre un mismo paso, el primer satélite lanzado fue, EROS-A, el segundo satélite EROS-B tiene un sensor con cámara pancromática de una resolución de 0.60cm, lo cual permite obtener modelos de superficie de alta resolución espacial. Para el desarrollo del proyecto se realizó una toma por pedido con el satélite EROS – B, el 26 de agosto de 2011 a la 1:17 pm de dos imágenes estereoscópicas (ver Figura 3).

Figura 3. Imágenes estereoscópicas del satélite EROS B tomadas en agosto de 2011
(manglar Rincón Mosquito, La Guajira).



Fuente: Elaboración propia

2.3. Fase de campo

Se realizaron tres salidas de campo con el fin de recopilar información primaria que permitió conocer el estado actual de la riqueza y la estructura de la vegetación del humedal Bello Horizonte. Para tal fin, se caracterizó la composición y la estructura de la vegetación de las principales áreas aledañas al humedal Bello Horizonte, comprendida entre el mar Caribe al norte, las cuencas bajas de los ríos Ancho (al oeste) y Mosquito (al este), y la carretera Troncal del Caribe al sur, en el municipio de Dibulla, departamento de La Guajira. Para caracterizar los bosques correspondientes a estas coberturas, se utilizó el método de cuadrantes centrados en un punto (PCQM, por sus siglas en inglés) descrito por Cottam y Curtis (1956), el cual consiste en términos generales, en el establecimiento de puntos de muestreo a lo largo de un transecto. Los muestreos dentro del área del manglar abarcaron 20 metros cuadrados valor que se utilizó como base para el cálculo de biomasa representativa del manglar. A cada árbol se le tomó la medición del diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura y se determinó la especie. Solamente fueron considerados los árboles con DAP mayor o igual a 2,5 cm. A partir de las medidas tomadas en campo (distancia al árbol más cercano, especie y DAP) por medio del método de cuadrantes centrados en un punto (PCQM), se calcularon los parámetros ecológicos de acuerdo con Mitchell (2010): densidad relativa (dr), que corresponde al porcentaje de individuos de una especie respecto al total de individuos de todas las especies, área basal o dominancia relativa (Dr), que es el porcentaje de área basal de una especie respecto al total de las áreas basales de todas las especies, y frecuencia relativa (Fr), que corresponde a la frecuencia absoluta de una especie sobre la frecuencia de todas las especies por 100. El área del Humedal Bello Horizonte se tomaron 20 parcelas en toda el área dentro de las cuales solo uno pudo ser dentro del manglar Rincón Mosquito.

2.3.1. Estimación de biomasa

Un enfoque para apoyar la estimación de stock de carbono de Niveles I, II y III involucra desarrollar una línea base actualizada del bosque a nivel regional, de una alta resolución espacial. Existen dos métodos para medir y estimar la biomasa arbórea sobre el suelo: el método directo y el indirecto (Rugnitz, Chacón y Porro, 2009). El método directo utiliza ecuaciones alométricas, el método indirecto utiliza factores de expansión de la biomasa

tomando como referencia el volumen del tronco principal (Rugnitz, Chacón y Porro, 2009). Para estimar la biomasa aérea en una cobertura forestal se realiza mediciones de campo, más la aplicación de unas ecuaciones alométricas que se ajusten al tipo de bosque (seco, húmedo o pluvial) o vegetación específica, relacionando diámetro a la altura del pecho (DAP), la densidad de la madera de los individuos muestreados a nivel de familia, género o especie, con la altura total, para este caso se consultó la base de datos mundial de densidades de especies Global Wood Density Database (<http://datadryad.org/handle/10255/dryad.235>). Para calcular la biomasa aérea se utilizó la ecuación alométrica (DAP,p,h) de Chave et al. (2005), por ser una ecuación más ajustada los estudios en bosques húmedos tropicales, donde las variables más importantes son las alturas de los árboles y la densidad de la madera como se enuncia a continuación:

$$B = \exp (-2.977 + \ln (\rho * DAP^2 * H))$$

Donde:

B = Biomasa aérea, materia seca sobre el suelo

exp = Es el exponente en base e (potencia)

Ln = Logaritmo natural

ρ = Es la densidad de la madera (g/cm³)

DAP = diámetro a la altura del pecho en cm

H = Es la altura total medida en metros (m)

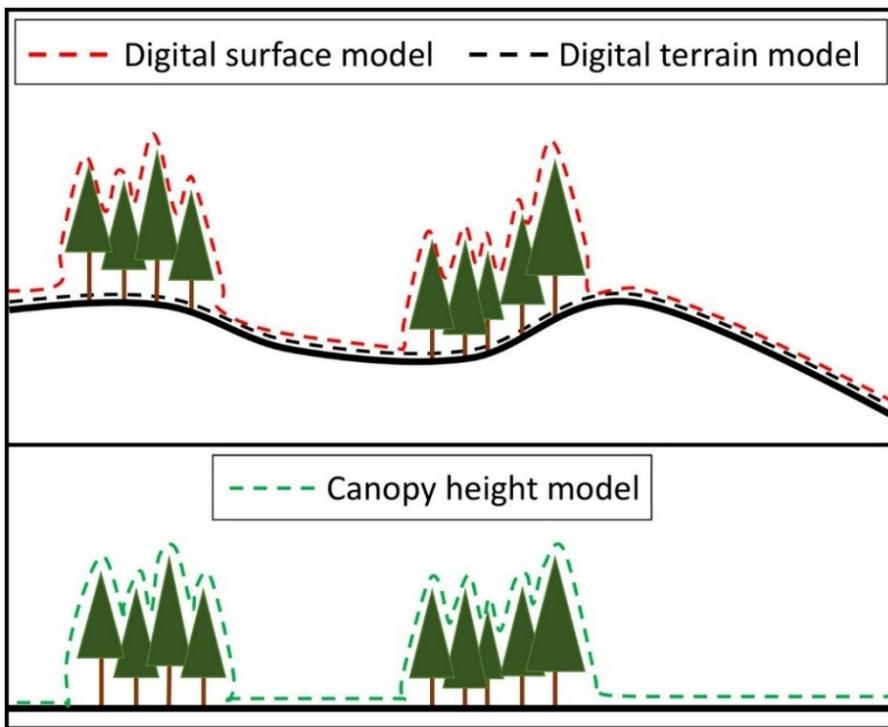
La altura del bosque se calcula analizando la diferencia entre la superficie del dosel (DSM) y la superficie del suelo (DTM). La densidad de la vegetación, o biomasa, se calcula analizando la densidad y la frecuencia para un área determinada. La estimación de la altura de los árboles es útil para el análisis del crecimiento y la aproximación del volumen de madera con lo cual se pueden identificar rápidamente áreas de crecimiento rápido y lento. Con el DTM y el DSM generados a partir de los datos LIDAR y de satélite, es posible estimar la altura de la vegetación sobre el suelo (CHM). Para calcular la altura de la vegetación, se

restó una superficie de la otra utilizando la herramienta de análisis raster (Minus) que se encuentra en la caja de herramientas de ArcGIS Spatial Analyst. Para calcular la densidad de biomasa, es necesario tener múltiples puntos de tierra descubierta (DTM) y todos los puntos por encima del suelo (DSM). La clave para determinar la densidad de biomasa es calcular el archivo ráster que se utilizará con el tamaño de celda correcto. Normalmente, deben usarse tamaños de celda cuatro veces el tamaño del espaciado promedio (LIDAR). Esto permite el promedio de píxeles y la eliminación de celdas sin valores nulos. Si se utilizan tamaños de píxel más pequeños, la frecuencia de las celdas nulas aumenta y puede sesgar los resultados. Para calcular la biomasa, se utilizó la herramienta Raster calculator en ArcGIS Spatial Analyst aplicando la ecuación alométrica (DAP,p,h) de Chave et al. (2005). Esta herramienta construye y ejecuta una expresión simple de Álgebra de mapas utilizando la sintaxis de Python en una interfaz similar a una calculadora.

2.3.2. Generación de DSM y DTM

Los modelos digitales de superficie DSM (Digital Surface Model por sus siglas en inglés) son la representación fiel de todas las variaciones de elevación de los objetos y superficies presentes en el momento de la toma de los datos; ya sea estos por herramientas fotogramétricas, LIDAR o radar. Estos pueden tener una estructura de representación de datos regular o irregular. La diferencia principal de los modelos digitales de terreno con los DSM es que los primeros representan solo los valores de elevación de los puntos más bajos de una superficie (terreno), a diferencia de los segundos que representan la elevación de la capa superficial de los objetos sobre el terreno. Los DTM (Digital Terrain Model por sus siglas en inglés) pueden ser un producto originado de algún proceso del DSM (Fuentes, Bolaños y Rozo, 2012). Los modelos de altura de la vegetación o CHM (Canopy Height Models por sus siglas en inglés) representa la altura real de los árboles, con la influencia de la elevación del suelo eliminada (ver Figura 4).

Figura 4. Representación esquemática de un DSM, DTM y CHM.



Fuente: Meddens et al., 2018

Los datos topográficos satelitales del área estudiada se derivaron de las imágenes estereoscópicas Eros B y puntos de control con GPS geodésicos doble frecuencia tomados en campo con el objetivo de reconstruir un modelo topográfico digital de superficie (DSM). El DSM es una capa de información que es útil en el proceso de cálculo de la altura de la vegetación. El estudio utilizó el módulo OrthoEngine del programa informático fotogramétrico PCI Geomatica para generar un DSM; se extrajeron coeficientes polinómicos racionales. Se definió una escala de análisis de 1: 10.000 para el área de estudio. Se utilizaron dos imágenes del sensor CCD EROS-B con un nivel de procesamiento L1A. Se ingresaron los puntos de control de tierra tomados en campo para ambas imágenes; los puntos de enlace (puntos ubicados en dos imágenes ráster superpuestas geográficamente); y se midieron los puntos de control en cada imagen (puntos coincidentes en cada imagen). Se creó un modelo matemático asociado a la posición del satélite para ambas imágenes estereoscópicas mediante la manipulación de datos de órbita y altura con los datos del punto de control lo que permitió reconstruir tridimensionalmente el área de estudio en un DMS de 2 metro de resolución

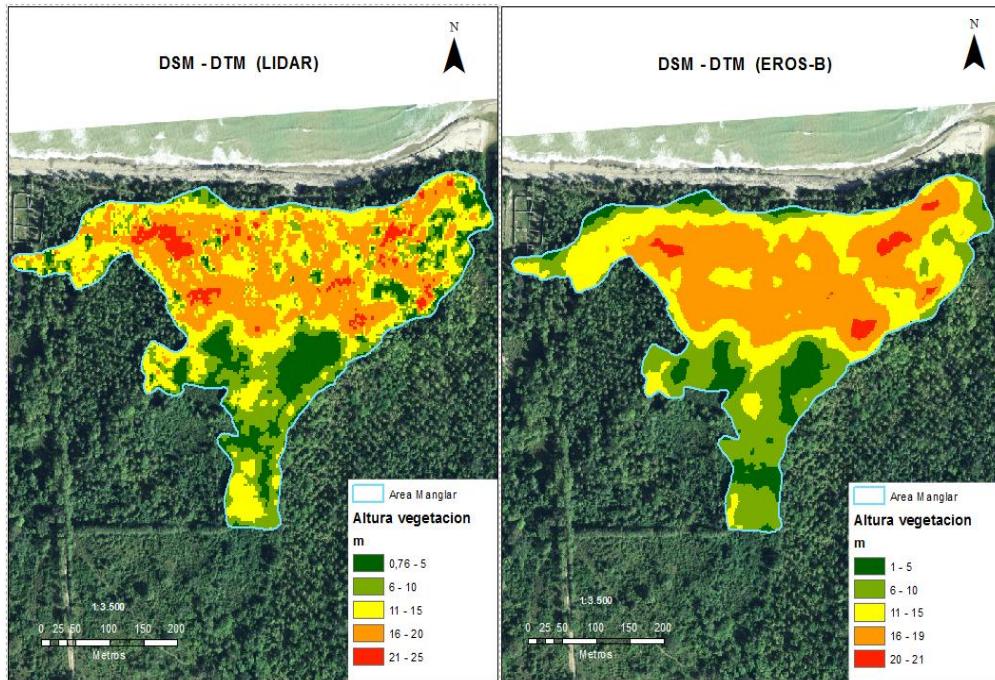
espacial, posteriormente se convirtió al nivel del terreno con el algoritmo DSM2DTM del programa PCI Geomatica, esta función convierte un modelo de superficie digital ráster (DSM o elevación) en un modelo digital de terreno desnudo (DTM). Los filtros se utilizan para eliminar elementos de la superficie, como edificios y árboles. Luego de obtener la topografía desde los datos de satélite se procedió a generar el modelo de superficie desde los datos LIDAR, para ello se importaron los puntos de elevación desde el formato LAS, este es un formato de archivo diseñado para el intercambio y archivo de datos de nube de puntos LIDAR, desde los archivos se obtuvieron los datos del DSM y DTM clasificados en la nube de puntos LIDAR, donde se pueden obtener los dos modelos del terreno directamente.

3. Resultados

3.1. Estimación de la altura de la vegetación

Con el geoprocесamiento de datos de elevación LIDAR y de satélite se pueden revelar las características de un bosque. En los resultados (ver Figura 5), el verde representa la vegetación baja y el rojo representa la vegetación alta. En este ejemplo, se puede ver claramente una diferencia en el detalle de los árboles en el área analizada, con la información LIDAR arroja alturas máximas de 25 metros a diferencia de los 21 metros en alturas máximas de los datos de satélite.

Figura 5. Comparación modelos de altura de la vegetación (CHM) LIDAR y EROS-B, (manglar Rincón Mosquito. La Guajira).



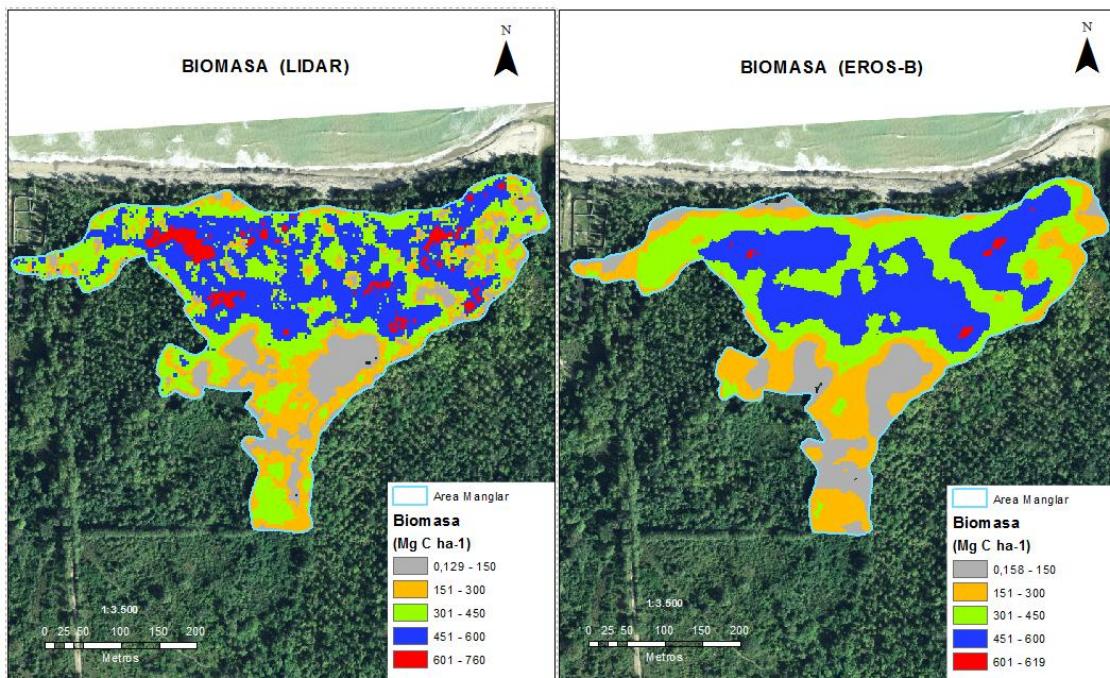
Fuente: Elaboración propia

3.2. Cálculo de densidad de biomasa

La densidad de biomasa dará una indicación del vigor y el crecimiento del árbol. Cuando un bosque es de las mismas especies, las áreas de bajo vigor pueden separarse rápidamente de las áreas de alto vigor y ser analizadas. En los análisis realizados, el espaciado promedio de puntos LIDAR fue de 0.5 metros por lo que el tamaño de la celda es de 2 metros para ser comparable con los datos de satélite que fueron remuestreados en la generación del DSM a 2 metros de resolución. La densidad de madera seleccionada de Global Wood Density Database para las especies de manglar fue para Laguncularia racemosa (0.62 g/cm^3) y para Rhizophora mangle (0.88 g/cm^3). Como las especies de manglar dentro del área no se pueden diferenciar espacialmente para realizar el cálculo individual por especie, se optó por promediar la densidad de madera para las 2 especies dando como resultado 0.75 g/cm^3 . El resultado de la ecuación es un ráster con valores expresados en contenidos de carbono (Mg C ha^{-1}). El dosel denso en LIDAR está representado por un valor máximo de 760 Mg C ha^{-1} .

1, y en el satélite EROS -B está representado por un valor máximo de 619 Mg C ha⁻¹ (ver Figura 6).

Figura 6. Comparación de biomasa de LIDAR y EROS-B, (manglar Rincón Mosquito. La Guajira).



Fuente: Elaboración propia

Luego de calcular la biomasa total desde los datos de satélite y LIDAR, se comparó la medida de biomasa tomada en campo sobre un área de 20 m² y se extrapoló al área total del manglar para realizar una comparación de los resultados de las distintas mediciones al nivel del muestreo en campo y de toda el área del manglar (ver Tabla 2).

Tabla 1. Comparación de biomasa con distintos métodos.

Áreas	Biomasa en campo	Biomasa LIDAR	Biomasa EROS-B
Muestra en terreno	1.147 (Mg C ha ⁻¹)	810 (Mg C ha ⁻¹)	173 (Mg C ha ⁻¹)

(20 m ²)			
Área total manglar (12,9 ha)	7.413.581 (Mg C ha-1)	5.236.044 (Mg C ha-1)	1.114.862 (Mg C ha-1)
%	100 %	71%	15%

Fuente: Elaboración propia

4. Discusión

La información tridimensional de la altura de la vegetación derivada de un DSM puede ser utilizada para estimar la biomasa aérea en conjunto con medidas alométricas. Las ecuaciones alométricas basadas en tierra se han usado por años para estimar la biomasa a partir de medidas de campo de diámetros de árboles, altura y densidad de la madera (Brown y Lugo 1984; Chave et al., 2005). Durante los últimos 20 años, ha habido un énfasis creciente en el uso de sensores activos como el radar, el escaneo láser (LIDAR) y sensores ópticos estéreo pasivos (imágenes satelitales) para estimar varias características 3D de la estructura del dosel y de la copa de los árboles (Goldbergs et al., 2019). En el análisis de los modelos de superficie del manglar Rincón Mosquito se pudo evidenciar que la medida de biomasa más cercana a los valores tomados en campo fue a partir del modelo de superficie generado por los datos de LIDAR, representando 5.236.044 (Mg C ha-1) en las 12,9 ha del manglar, si tomamos como referencia que el área extrapolada con los datos medidos en campo fue de 7.413.581 (Mg C ha-1) se tuvo una correspondencia de 71% entre el LIDAR y los datos de campo. Por otro lado, los datos obtenidos desde la referencia de la superficie satelital de las imágenes estereoscópicas EROS-B solo correspondieron al 15% (1.114.862 (Mg C ha-1) comparado con los datos extrapolados de campo. En gran medida los resultados obtenidos entre los estudios varían, según el tipo de sensor, las especies de árboles y las condiciones del sitio. En todo el mundo, los datos LiDAR, combinados con métodos de procesamiento de datos avanzados y actualizados, han demostrado ser herramientas eficientes y precisas para la estimación indirecta a escala fina de los parámetros de la estructura 3D del bosque (principalmente la altura del árbol) derivados de nubes de puntos 3D de alta densidad tipo LIDAR (Asner y Mascaro, 2014; Goldbergs et al., 2018^a; Lefsky et al., 2002a; Maltamo, Næsset y Vauhkonen, 2014). Lo que se pudo corroborar en el análisis de la superficie del

manglar desde los datos LIDAR. En contraste, las mediciones de LIDAR son nuevas, relacionan medidas aéreas de la estructura tridimensional del bosque, incluyendo la altura y el perfil vertical del dosel, con estimaciones de campo. Este enfoque es paralelo a los estudios de campo tradicionales que usan medidas manuales de diámetro y altura de árboles para estimar la biomasa a nivel de parcela (Asner, 2009). Una gran ventaja de este enfoque es que el LIDAR puede mapear miles de hectáreas de bosque por día, mientras que con las parcelas de campo no se puede lograr la misma cobertura geográfica (Asner, 2009). Sin embargo, actualmente hay poca experiencia sobre la precisión con la que se pueden estimar los atributos de la masa arbórea utilizando imágenes estéreo de satélite, por esta razón se evalúo y comparo la integridad y precisión vertical de los modelos extraídos de la altura de la vegetación particularmente en un área pequeña y de poca extensión como el manglar Rincón Mosquito.

Los costos de adquisición relativamente altos evitan que el LIDAR se use en vastos territorios. Los enfoques de estimación LIDAR en biomasa pueden ser tan certeros como los enfoques de medición en biomasa (alométricos) usados a nivel de parcela (Asner, 2009). Al considerar alternativas al LIDAR para estudios continuos de áreas amplias, se deben considerar enfoques más rentables que utilicen datos satelitales (Goldbergs et al., 2019). Las principales ventajas de los datos satelitales sobre los datos de LIDAR incluyen una resolución temporal más alta, un costo más bajo, una cobertura de área más amplia y un contenido de imagen espacialmente más homogéneo con información multiespectral (Immitzer et al., 2016). En el caso de estudio del manglar Rincón Mosquito el uso de imágenes satelitales de alta resolución, no permitió obtener un resultado satisfactorio sobre la estimación de la biomasa aérea desde un DSM satelital, teniendo en cuenta que el área analizada fue relativamente pequeña 12.9 ha. En comparación con los buenos resultados en áreas de mayor extensión obtenidos por otros estudios con imágenes estéreo derivadas de satélite de muy alta resolución para generar modelos de superficie y respaldar el inventario y monitoreo forestal (White et al., 2013). Sin embargo, el rendimiento de la coincidencia de imágenes aplicado a las imágenes estéreo satelitales de muy alta resolución para el inventario forestal no se ha estudiado de manera intensiva (Goldbergs et al., 2019). Una alternativa más económica al uso de información LIDAR a partir de imágenes estereoscópicas, es la generación de modelos de superficie desde los datos tomados con vehículos aéreos no tripulados o drones. En los

últimos años se ha incrementado su utilización en la generación de modelos DSM, varios estudios han evaluado de manera efectiva la combinación de técnicas modernas de comparación de imágenes y sistemas aéreos no tripulados para extraer parámetros estructurales biofísicos y verticales de árboles en diferentes tipos del bosque australiano (Hung, Bryson y Sukkarieh, 2012; Wallace et al., 2012, 2016). (Goldbergs et al., 2018b) evaluaron la eficiencia de las imágenes aéreas de drones de bajo costo para estimar los parámetros estructurales de los árboles y cuantificar la biomasa en las sabanas tropicales australianas.

5. Conclusiones

El uso de herramientas geoespaciales muestra una fácil integración y gran aplicabilidad dentro de los proyectos de estimación de carbono, particularmente en el cálculo de alturas y cuantificación de biomasa aérea. El objetivo principal de este análisis fue evaluar el potencial de imágenes estéreo de alta resolución satelital vs datos de LIDAR aerotransportado, para estimar las variables de altura de la vegetación (CHM). Con los pares estéreo de satélite se derivó un DSM, en la misma área y condiciones, se utilizó un DSM derivado de LIDAR y se analizó el cálculo de biomasa comparándolos con datos tomados en campo con una parcela tradicional.

En términos de escalas detalladas se puede concluir que el sensor con mayor precisión es el LIDAR al tener un nivel de resolución espacial que permite reconstruir en gran detalle la masa arbórea, puede ser limitado su uso en proyectos REDD+ que no cuenten con mucho presupuesto, principalmente por ser un sensor de alto costo que no puede ser aplicable en grandes extensiones. Pero cada vez es más claro que la noción tradicional de que se requieren cientos de parcelas por tipo de vegetación no está soportada por la literatura actual de LIDAR, por lo tanto, disminuye la necesidad de programas prolongados de medición y monitoreo en bosques.

En esta investigación, la evaluación de las imágenes estéreo Eros-B, demostró que en escalas detalladas no son precisas en la estimación desde modelos de superficie satelitales, principalmente debido a que se necesita un detalle mucho mayor en resolución espacial para reconstruir tridimensionalmente áreas pequeñas. El uso de estero pares satelitales es viable

en grandes extensiones y no en pequeñas áreas, donde particularmente en los últimos años, los datos fotogramétricos de alta resolución como los tomados con vehículos aéreos no tripulados parecen ser una alternativa más viable en disponibilidad y costo que de la tecnología LIDAR o satelital para la reconstruir la masa forestal.

6. Agradecimientos

Este estudio estuvo enmarcado dentro del proyecto “Definición de los límites naturales del humedal Bello Horizonte (Dibulla, La Guajira, Colombia), sus zonas de ronda y su área de amortiguamiento” realizado por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andréis” - INVEMAR. Se agradece principalmente a toda la comunidad de Dibulla, y a todos los investigadores que han aportado al desarrollo de este estudio.

7. Referencias bibliográficas

- Aslan, A., Rahman, A. F., y Robeson, S. M. (2018). Investigating the use of Alos Prism data in detecting mangrove succession through canopy height estimation. *Ecological Indicators*, 87, 136-143. doi: 10.1016/j.ecolind.2017.12.008
- Asner, G. P. (2009). Tropical forest carbon assessment: integrating satellite and airborne mapping approaches. *Environmental Research Letters*, 4(3), 034009. doi: 10.1088/1748-9326/4/3/034009
- Asner, G. P., y Mascaro, J. (2014). Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric. *Remote Sensing of Environment*, 140, 614-624. doi: 10.1016/j.rse.2013.09.023
- Brown, S., y Lugo, A. E. (1984). Biomass of Tropical Forests: A New Estimate Based on Forest Volumes. *Science*, 223(4642), 1290. doi: 10.1126/science.223.4642.1290
- Brown, S., Pearson, T., Slaymaker, D., Ambagis, S., Moore, N., Novelo, D., y Sabido, W. (2005). Creating a virtual tropical forest from three-dimensional aerial imagery to

estimate carbon stocks. Ecological applications, 15(3), 1083-1095. doi: 10.1890/04-0829

Cabrera, E. (2011). Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia, Nivel subnacional escala gruesa y fina. Bogotá, Colombia: IDEAM.

Cottam, G., y Curtis, J. T. (1956). The Use of Distance Measures in Phytosociological Sampling. Ecology, 37(3), 451-460. doi: 10.2307/1930167

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. Oecologia, 145(1), 87-99. doi: 10.1007/s00442-005-0100-x

Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., y Tanabe, K. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (Vol. 5). Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies.

Fuentes, J. E., Bolaños, J. A., y Rozo, D. M. (2012). Modelo digital de superficie a partir de imágenes de satélite IKONOS para el análisis de áreas de inundación en Santa Marta, Colombia. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR, 41, 251-266.

Fuentes, J., Varga, D., y Pintó, J. (2018). The Use of High-Resolution Historical Images to Analyse the Leopard Pattern in the Arid Area of La Alta Guajira, Colombia. Geosciences, 8(10), 366. doi: 10.3390/geosciences8100366

García Arbeláez, C., Barrera, X., Gómez, R., y Suárez Castaño, R. (2015). El ABC de los compromisos de Colombia para la Cop 21. Bogotá: WWF-Colombia.

García, M., Saatchi, S., Ustin, S., y Balzter, H. (2018). Modelling forest canopy height by integrating airborne LiDAR samples with satellite Radar and multispectral imagery.

International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 66, 159-173.
doi: 10.1016/j.jag.2017.11.017

Goldbergs, G., Levick, S. R., Lawes, M., y Edwards, A. (2018a). Hierarchical integration of individual tree and area-based approaches for savanna biomass uncertainty estimation from airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 205, 141-150. doi: 10.1016/j.rse.2017.11.010

Goldbergs, G., Maier, S. W., Levick, S. R., y Edwards, A. (2018b). Efficiency of Individual Tree Detection Approaches Based on Light-Weight and Low-Cost UAS Imagery in Australian Savannas. *Remote Sensing*, 10(2), 161.

Goldbergs, G., Maier, S. W., Levick, S. R., y Edwards, A. (2019). Limitations of high-resolution satellite stereo imagery for estimating canopy height in Australian tropical savannas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 75, 83-95. doi: 10.1016/j.jag.2018.10.021

Hung, C., Bryson, M., y Sukkarieh, S. (2012). Multi-class predictive template for tree crown detection. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68, 170-183. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2012.01.009

Immitzer, M., Stepper, C., Böck, S., Straub, C., y Atzberger, C. (2016). Use of WorldView-2 stereo imagery and National Forest Inventory data for wall-to-wall mapping of growing stock. *Forest Ecology and Management*, 359, 232-246. doi: 10.1016/j.foreco.2015.10.018

Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Harding, D. J., Parker, G. G., Acker, S. A., y Gower, S. T. (2002a). Lidar remote sensing of above-ground biomass in three biomes. *Global Ecology and Biogeography*, 11(5), 393-399. doi: 10.1046/j.1466-822x.2002.00303.x

Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., y Harding, D. J. (2002b). Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies: Lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists. *BioScience*, 52(1), 19-30. doi: 10.1641/0006-3568(2002)052[0019:lrsfes]2.0.co;2

Maltamo, M., Næsset, E., y Vauhkonen, J. (2014). Forestry applications of airborne laser scanning. Concepts and case studies. *Manag For Ecosys*, 27, 460.

Meddens, A. J. H., Vierling, L. A., Eitel, J. U. H., Jennewein, J. S., White, J. C., y Wulder, M. A. (2018). Developing 5 m resolution canopy height and digital terrain models from WorldView and ArcticDEM data. *Remote Sensing of Environment*, 218, 174-188. doi: 10.1016/j.rse.2018.09.010

Menon, S., Denman, K. L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P. M., . . . Holland, E. (2007). Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. Berkeley, CA (United States): Lawrence Berkeley National Lab (LBNL).

Mielcarek, M., Stereńczak, K., y Khosravipour, A. (2018). Testing and evaluating different LiDAR-derived canopy height model generation methods for tree height estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 71, 132-143. doi: 10.1016/j.jag.2018.05.002

Mitchell, K. (2010). Quantitative analysis by the point-centered quarter method. arXiv preprint. Recuperado de <https://arxiv.org/abs/1010.3303>

Nfotabong-Atheull, A., Din, N., y Dahdouh-Guebas, F. (2013). Qualitative and Quantitative Characterization of Mangrove Vegetation Structure and Dynamics in a Peri-urban Setting of Douala (Cameroon): An Approach Using Air-Borne Imagery. *Estuaries and Coasts*, 36(6), 1181-1192. doi: 10.1007/s12237-013-9638-8

Rugnitz, M., Chacón, M., y Porro, R. (2009). Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. Lima, Perú: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF)/Consorcio Iniciativa Amazónica (IA).

Sullivan, F. B., Ducey, M. J., Orwig, D. A., Cook, B., y Palace, M. W. (2017). Comparison of lidar- and allometry-derived canopy height models in an eastern deciduous forest. *Forest Ecology and Management*, 406, 83-94. doi: 10.1016/j.foreco.2017.10.005

Wallace, L., Lucieer, A., Malenovský, Z., Turner, D., y Vopěnka, P. (2016). Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forests*, 7(3), 62.

Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., y Turner, D. (2012). Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory. *Remote Sensing*, 4(6), 1519-1543. doi: 10.3390/rs4061519

White, J. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Coops, N. C., Pitt, D., y Woods, M. (2013). The Utility of Image-Based Point Clouds for Forest Inventory: A Comparison with Airborne Laser Scanning. *Forests*, 4(3), 518-536.

Yin, D., y Wang, L. (2019). Individual mangrove tree measurement using UAV-based LiDAR data: Possibilities and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 223, 34-49. doi: 10.1016/j.rse.2018.12.034

Zhu, X., Hou, Y., Weng, Q., y Chen, L. (2019). Integrating UAV optical imagery and LiDAR data for assessing the spatial relationship between mangrove and inundation across a subtropical estuarine wetland. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149, 146-156. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2019.01.021