



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-117

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Estimación de biomasa con tecnología LiDAR aerotransportada en las áreas boscosas del Parque Nacional Volcán Poás (Costa Rica)

NAVARRO, J.A.^{1,2} y FERNÁNDEZ-LANDA, A.¹, CONDÉS, S.² ALGEET-ABARQUERO, N.¹

¹ Agresta S. Coop. C/ Duque de Fernán Núñez, 2, 1º 28012. Madrid.

² MONTES (ETSI de Montes, Forestal y del Medio Natural), Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

Resumen

Los bosques tropicales juegan un papel clave en el ciclo global del carbono. El programa REDD+ exige un mecanismo de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) para lo cual se ha de generar métodos sencillos y baratos para evaluar las existencias de carbono. La tecnología LiDAR aerotransportada se presenta como una solución práctica y económica para la evaluación de este recurso a gran escala, aunque aún es necesario evaluar los métodos actuales y desarrollar nuevos que permitan reducir la incertidumbre y aumentar la precisión en la estimación de la biomasa. En este estudio se han inventariado 26 parcelas de campo distribuidas en un amplio rango de zonas, abarcando la variabilidad estructural y ecológica del Parque Nacional Volcán Poás (Costa Rica). Se ha generado un modelo de biomasa aérea total (AGB) con un RMSE de 105,76 t ha⁻¹ de materia seca (33,85%), que depende de la altura media de copas (TCH) y usa aproximaciones regionales de área basimétrica y densidad de madera. El valor medio de la AGB en la zona de estudio ha sido de 290,03 t ha⁻¹, y las existencias totales de carbono incluyendo las acumuladas en los sistemas radicales suman 720.615,5 toneladas. Los bosques del Volcán Poás tienen altos valores de área basimétrica, por lo que acumulan gran cantidad de carbono y es importante su conservación como reservorio de este elemento.

Palabras clave

REDD+, alometría, tropical, carbono.

1. Introducción

Según el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC hay claras evidencias de un calentamiento global provocado por el aumento del efecto invernadero. Este incremento es debido a la mayor emisión de gases de efecto invernadero (GEI) en la era industrializada (IPCC, 2007).

Los bosques juegan un doble papel de vital importancia en la regulación del ciclo global del carbono puesto que actúan como fuentes y sumideros de carbono. Actúan como fuentes de carbono mediante la deforestación, la degradación y el cambio de uso del suelo suponiendo el 17,3% del total de las emisiones de GEI (IPCC, 2007). Como sumidero, el IPCC (2007) estima que aproximadamente un 77% de todo el carbono almacenado en la vegetación y un 39% de todo el carbono almacenado en el suelo está presente en los bosques. En concreto, los bosques tropicales alcanzan una gran importancia en este sentido al poder almacenar mayor cantidad de carbono por hectárea que otro tipo de bosques (HOUGHTON, 2005), y acumulando del orden del 25% del carbono de la biosfera (BONAN, 2008). En la Evaluación de los Recursos Forestales mundiales 2010 (FAO, 2010) se aprecia que las áreas con mayor tasa de deforestación se encuentran en los trópicos, siendo los bosques tropicales los más amenazados del planeta.

Para intentar frenar las emisiones de GEI debidas a pérdida de bosques, se reconoció la reducción de emisiones por deforestación y degradación de los bosques (REDD) como un mecanismo válido en la lucha contra el cambio climático (UNFCCC COP-16 Conference). Costa Rica implementó esta iniciativa integrando los datos de carbono capturado en sus Parques Nacionales y Reservas Biológicas en sus esquemas.

En las actividades REDD+ debe constar un sistema transparente de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) de las reservas de carbono. Este mecanismo puede tener costes muy elevados si se pretende hacer un monitoreo de las existencias de carbono preciso, por lo que interesa conocer un sistema que permita realizar mediciones a gran escala precisas y baratas.

El LiDAR (Light Detection and Ranging) es un sistema activo de detección remota basado en un sensor laser. En la tecnología LiDAR aerotransportada el instrumental se monta en un avión y el sistema LiDAR mide el tiempo de ida y vuelta de un pulso láser. Este pulso incide sobre la superficie sobrevolada, rebota y se refleja sobre el sensor, asignándose a cada tiempo de respuesta una cota (DRAKE et al., 2002). La tecnología LiDAR es una poderosa herramienta en la estimación precisa de toda la variación espacial de las reservas de carbono forestal. Aunque puede ser cara (GIBBS et al. 2007, PIROTTI, 2011), es la tecnología más apropiada en escalas de miles hasta algunos millones de hectáreas y es útil para calibrar en mayores escalas mediciones de Radar interferométrico de apertura sintética (SEXTON et al. 2009).

La utilidad del LiDAR para estimar variables forestales en bosques tropicales ha sido probada in diferentes trabajos. CLARK et al. (2004) estimaron la altura media de plantaciones en la Estación Biológica de La Selva (Costa Rica) usando la altura media LiDAR con un modelo R^2 de 0,97 y 1,08 m de error cuadrático medio (RMSE). CLARK et al (2011), también en La Selva, generaron un modelo de biomasa aérea con un R^2 de 0,90 RMSE de 38,3 t ha⁻¹ incluyendo en el modelo dos variables LiDAR (altura media a nivel de parcela y altura máxima).

ASNER y MASCARO (2014) desarrollaron un modelo alométrico global a nivel de parcela basado en la variable LiDAR altura media de copas (TCH por sus siglas en inglés) usando una red de parcelas de diferentes bosques tropicales con datos LiDAR en Colombia, Hawái, Madagascar, Perú, y Panamá para estimar la densidad de carbono a lo largo de una amplia variedad de condiciones de vegetación tropical. De acuerdo a esta metodología se pueden reducir los costes de inventario en áreas tropicales puesto que el trabajo de campo puede reducirse a medir el área basimétrica de las parcelas para obtener una regresión local área basimétrica-TCH con la que estimar la biomasa del bosque.

2. Objetivos

El objetivo del proyecto es utilizar en los bosques del Poás la ecuación global de biomasa aérea a nivel de parcela desarrollada por ASNER y MASCARO (2014) y comparar los resultados con los obtenidos mediante ajustes locales para el área de estudio con la intención de validar este modelo global y las ventajas de usar ajustes locales en vez de usar las ecuaciones de ASNER y MASCARO. Se pretende hacer un mapa de existencias de biomasa y de carbono que pueda servir de ayuda en la gestión del Parque Nacional Volcán Poás, mediante la aplicación de la tecnología LiDAR aerotransportada apoyada en trabajo de campo con parcelas de muestreo temporales, siendo este Parque un área de interés para la utilización de la ecuación global debido a su alta variabilidad estructural y ecológica.

3. Metodología

3.1. Área de estudio y datos

El estudio ha sido llevado a cabo en el Parque Nacional Volcán Poás, en la provincia de Alajuela de Costa Rica. Se trata de un complejo estratovolcán con un terreno en general escarpado y un rango de altitudes desde los 1099 m.s.n.m. hasta los 2713 m.s.n.m.

Debido a que el Parque posee dos vertientes (Pacífico y Atlántico), una topografía abrupta y gran rango altitudinal, las precipitaciones medias anuales (2.300-5.100 mm) y las temperaturas medias anuales (9-15°C) sufren importantes oscilaciones a lo largo de la zona de estudio. Las zonas de vida de Holdridge presentes en el Parque según el mapa ecológico de Costa Rica (BOLAÑOS et al, 2005) son: Bosque pluvial Premontano (bp-PM), Bosque pluvial Montano Bajo (bp-MB), Bosque pluvial Montano (bp-M), Bosque pluvial montano transición a montano bajo (bp-M6) y Bosque muy húmedo Montano Bajo (bmh-MB).

Los datos de partida para la realización de este estudio han sido el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y Modelo Digital de Superficie (MDS), ambos con un paso de malla de 1-m, procedentes del vuelo LiDAR planificado y realizado por la empresa Stereocarto S.L. en julio de 2010. El sensor utilizado fue un ALS50-II con MpiA (multi pulse in air) con una densidad de puntos promedio de 1 punto m⁻². Los modelos utilizan el Sistema de Referencia CRO5 y la Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica CRTM05. Mediante la diferencia de ambos modelos se ha obtenido un Modelo Digital de Alturas de Vegetación (MDHV) que representa la altura máxima de la vegetación en cada píxel de 1-m.

Con la intención de abarcar la variabilidad estructural y ecológica del Parque, se ha realizado un muestreo estratificado por zonas de vida de Holdridge. Se generó un mapa de alturas de vegetación a partir de los datos LiDAR para identificar las diferencias en la estructura horizontal y vertical de la masa. Para ello se construyó un ráster con una resolución de 20-m a partir de un código formado por tres estadísticos LiDAR: (i) Fracción de Cobertura Cubierta (FCC) como el porcentaje de píxeles sobre 2,00 m, (ii) percentil 95 de alturas (P95) and (iii) rango intercuartílico (IQ) (Tabla 1)

Tabla 1. Estadísticos extraídos en cada píxel de 20x20 metros para generar el código de caracterización de la estructura de la vegetación del Parque Nacional Volcán Poás (Costa Rica)

Variable	Rango	Valor
FCC	0-85,5%	1
	85,5-99,5%	2
	99,5-100%	3
P95	2-21 m	1
	21-27 m	2
	>27 m	3
IQ	0-5 m	1
	5-8 m	2
	>8 m	3

3.2. Medición de las parcelas de muestreo

Se han establecido 25 parcelas circulares de 0,04 ha siguiendo las pistas y senderos transitables del Parque, las cuales actúan como transectos, tratando de abarcar la variabilidad estructural y ecológica del Parque a partir del código generado (Tabla 1). Se ha mantenido una distancia suficiente entre las parcelas y las pistas para evitar posibles efectos que puedan afectar a las mediciones. En cada parcela se han medido todos los diámetros mayores de 5 cm y se han identificado hasta el máximo nivel taxonómico posible todos los pies inventariables. Las alturas de los helechos arborescentes y de las palmas se han medido con hipsómetro Vertex III. Todas las parcelas

han sido georreferenciadas en el sistema de coordenadas CRTM05 mediante un GPS Garmin GPSmap76Cx que tiene una precisión típica de posicionamiento menor de 5 metros.

Para el cálculo de la biomasa aérea en cada una de las parcelas se ha procedido a la estimación de la biomasa de cada uno de los pies inventariados mediante la utilización de ecuaciones alométricas. Se ha aplicado la ecuación de CHAVE (modelo II) (Ecuación 1) para bosques tropicales lluviosos (CHAVE et al., 2005). Se ha utilizado este modelo que no incluye alturas de árboles dada la dificultad de medirlas en campo por la complejidad de la masa y los recursos disponibles.

$$(1) agb = \rho \times \exp(-1.239 + 1.98 \times \ln(DBH) + 0.207 \times (\ln(DBH))^2 - 0.0281 \times (\ln(DBH))^3)$$

donde agb es la biomasa del árbol en kg, d el diámetro a la altura del pecho en cm, h la altura del árbol en m, y ρ la densidad básica de la madera (peso seco en horno entre volumen fresco) en $g\ cm^{-3}$.

En el cálculo de la biomasa de palmas se ha utilizado la ecuación (Ecuación 2) propuesta por FRANGI y LUGO (1985) para *Prestoea montana* (Graham) G. Nicholson, una especie de bosques húmedos de Puerto Rico. En el caso de helechos arborescentes se ha optado por la regresión (Ecuación 3) propuesta por TIEPOLO et al. (2002) para el género *Cyathea* de bosques tropicales húmedos de montaña del Parque Nacional Serra do Mar, Brasil.

$$(2) agb = 10.0 + 6.4 \times h$$

$$(3) agb = -4266348 / (1 - 2792284 \times e^{0.313677 \times h})$$

En ambas ecuaciones h hace referencia a la altura en metros. Todas las ecuaciones utilizadas dan valores de biomasa en Kg peso seco.

En la estimación de la densidad de madera de cada individuo medido se ha utilizado la Global Wood Density Database (CHAVE et al. 2009, ZANNE et al. 2009). Se han usado los valores del género o la familia cuando no ha sido posible utilizar los valores de la especie en concreto. Cuando no se han podido identificar los pies se han utilizado los valores de densidad de madera medios reportados en la Readiness Preparation Proposal (2008) (MINAET y FONAFIFO, 2010) basados en estudios de CHUDNOFF mencionados por SOLÓRZANO (1992).

La biomasa aérea (AGB) de cada parcela es la suma de la biomasa de cada árbol (agb), palma y helecho arborescente medido en la parcela en $t\ ha^{-1}$.

3.3. Alometría conjunta de parcela

Se ha calculado la TCH en cada parcela, entendiendo este parámetro como la altura media con 1 metro de resolución del MDHV dentro de las parcelas. En los bosques tropicales las copas de los árboles pueden sobrepasar fácilmente los 20 metros de diámetro, superando, por tanto, los 20x20 m de las parcelas de muestreo y provocando efecto borde. Esto es, árboles que estén fuera de la parcela pero sus copas están dentro, o viceversa. Esto puede alterar los resultados del estudio, por lo que para evitarlo se ha aumentado el tamaño de los cortes con respecto al de las parcelas de muestreo hasta los 25x25 m. De este modo se asegura que entren todos los árboles medidos y se minimiza el error debido al GPS, mejorando por tanto el solape entre los datos LiDAR y la parcela de campo.

Basándose la teoría general de alometría de árbol (CHAVE et al., 2005), ASNER y MASCARO (2014) proponen, a través de un enfoque de alometría conjunta de parcela, un modelo global para

estimar la biomasa aérea de bosques tropicales calibrado a partir de datos LiDAR de parcelas en Colombia, Hawái, Madagascar, Perú, y Panamá.

$$(4) AGB = 7.9912 \cdot TCH^{0.2807} \cdot G^{0.9721} \cdot \rho_G^{1.3763}$$

donde TCH es la altura media de copas en m, G es el área basimétrica de la parcela en $m^2 ha^{-1}$, y ρ_G es la densidad de madera ponderada por el área basimétrica y medida en $g cm^{-3}$. Esta ecuación fue ajustada para obtener la densidad de carbono, por lo que se ha transformado a valores de biomasa aérea usando un factor de conversión de $0,48^{-1}$ (MARTIN y THOMAS, 2011).

En este estudio se ha utilizado la aproximación universal de ASNER y MASCARO (2014) y además se ha realizado un ajuste específico para los bosques del Volcán Poás siguiendo la metodología de la alometría conjunta de parcela.

Así, se ha relacionado la altura media de copas con el área basimétrica y se ha obtenido un valor de densidad de madera medio ponderado por G para cada parcela. Para ello, se han utilizado modelos lineales simples. En el caso del modelo TCH-G se le ha forzado a pasar por el origen asumiendo que si TCH es cero, G no debe ser mucho mayor que cero (ASNER y MASCARO, 2014). La relación entre G y TCH se denomina coeficiente de espesura (SC por sus siglas en inglés) (ASNER et al. 2012) y caracteriza la variabilidad estructural de los diferentes bosques tropicales estudiados.

Para ajustar la ecuación alométrica local para el Parque Nacional Volcán Poás se ha usado la función *Nonlinear Least Squares (nls)* del paquete *stats* incluido en el software R (R CORE TEAM, 2013). En el ajuste del modelo local de AGB y en la validación del modelo global para el área de estudio se han calculado el sesgo (Ecuación 5), la raíz del error cuadrático medio (Ecuación 6), el sesgo relativo (Ecuación 7) y la raíz del error cuadrático medio relativa (Ecuación 8) como estadísticos de contraste:

$$(5) b = \frac{\sum_1^n (AGB_i - \overline{AGB}_i)}{n}$$

$$(6) RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (AGB_i - \overline{AGB}_i)^2}{n}}$$

$$(7) b\% = \left(\frac{b}{\overline{AGB}}\right) \times 100$$

$$(8) RMSE\% = \left(\frac{RMSE}{\overline{AGB}}\right) \times 100$$

4. Resultados

Tabla 2. Resumen de los parámetros medidos en las parcelas de campo ($n = 25$).

	Media	Mínimo	Máximo	Desviación típica
$G (m^2 ha^{-1})$	58.50	30.97	84.11	13.04
Densidad de madera ($g cm^{-3}$)	0.60	0.51	0.70	0.05
N (pies ha-1)	1699.00	425.00	2500.00	546.94
TCH (m)	15.28	8.51	20.74	3.34
AGB (t ha-1)	405.16	168.26	987.69	175.10

La biomasa aérea de toda la zona de estudio se ha estimado aplicando la aproximación de densidad de carbono propuesta por ASNER y MASCARO (2014) para un amplio rango de zonas tropicales y mediante un ajuste específico para los bosques del Volcán Poás. Para ello se han

obtenido los valores de área basimétrica para todo el Parque Nacional a partir de una regresión lineal TCH-G. Estas dos variables están significativamente correlacionadas (p -valor < 0,001). Por el contrario, no ha existido relación ninguna entre la densidad de madera ponderada por el área basimétrica y la altura media de copas (p -valor > 0,005), lo que unido a la su poca variabilidad a lo largo del muestreo ($0,60 \pm 0,05$), sugiere que puede usarse un valor constante para todo el área de estudio.

El coeficiente de espesura ha sido calculado para toda la zona de estudio ($SC=3,70$). Sin embargo, es probable que esta relación no sea constante a lo largo de toda la zona de estudio y en todas las zonas de vida incluidas en el Parque Nacional (Figura 2). Parecen existir diferentes tendencias en las distintas zonas de vida pudiéndose calcular el SC de forma independiente en cada una de estas. El bajo número de parcelas hace inviable estimar este parámetro de forma fiable en cada una de las zonas de vida.

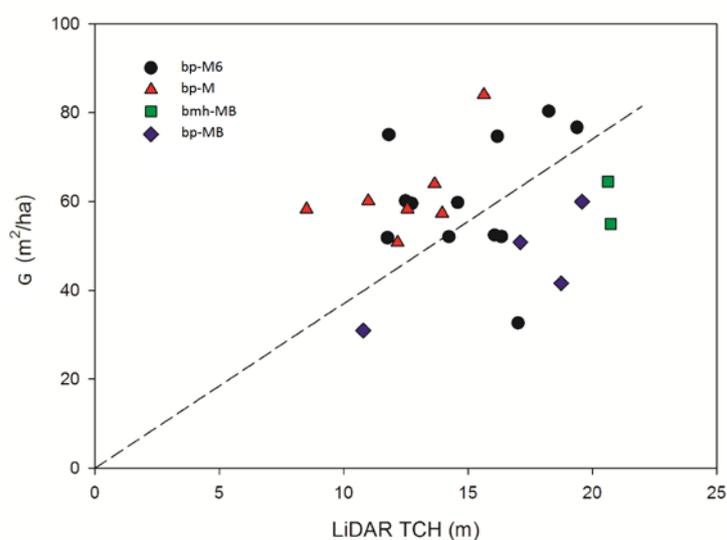


Figura 1. Regresión TCH-G

El ajuste local para los bosques del Poás (Ecuación 9) tiene un $RMSE=32.80 \text{ t ha}^{-1}$. Al usar la regresión TCH-G (Figura 2a) las estimaciones disminuyen considerablemente su precisión con respecto al uso de los valores de área basimétrica medidos en campo (Figura 2b).

$$(9) \quad AGB = 1.92262 \cdot TCH^{0.30201} \cdot G^{1.17260} \cdot \rho_G^{0.59760}$$

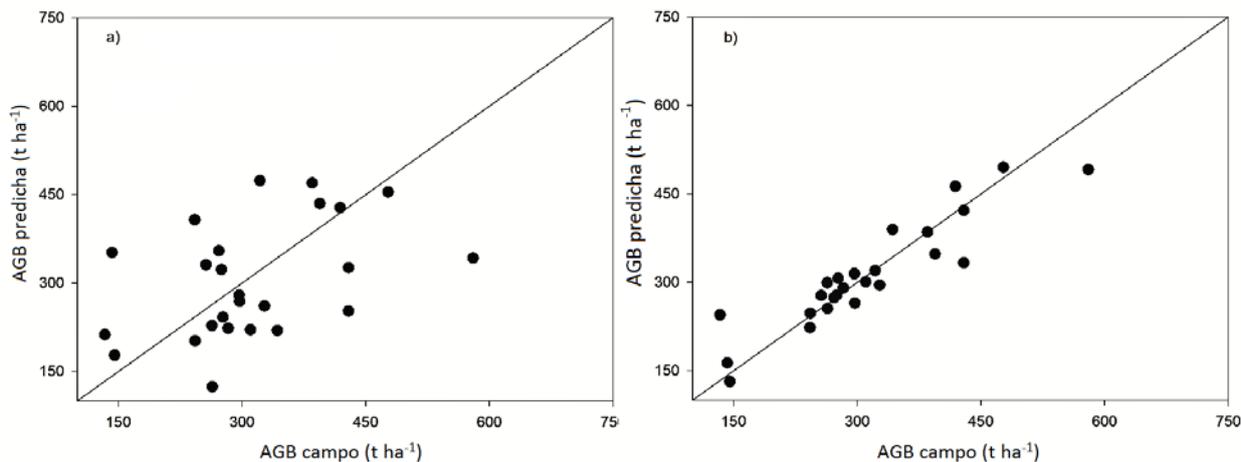


Figura 2. Modelo alométrico conjunto local para el P.N. Volcán Poás. a) G estimada con regresión TCH-G, b) G estimada en campo.

Al igual que el modelo local, el modelo global de ASNER y MASCARO (2014) funciona peor cuando se usa la relación TCH-G (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación del modelo global de AGB de ASNER y MASCARO (2014) cuando se usan valores de área basimétrica (G) medidos en campo y obtenidos a partir de la regresión TCH-G. b es el sesgo, RMSE es la raíz del error medio cuadrático, b% es el sesgo relativo y RMSE% es la raíz del error cuadrático medio relativa.

G	b (t ha ⁻¹)	RMSE (t ha ⁻¹)	b%	RMSE%
Campo	-37.82	102.27	-9.33	25.24
SC	-27.50	164.62	-6.79	40.63

Se han generado mapas de área basimétrica y altura media de copas con una resolución de 25 metros (Figura 3)).

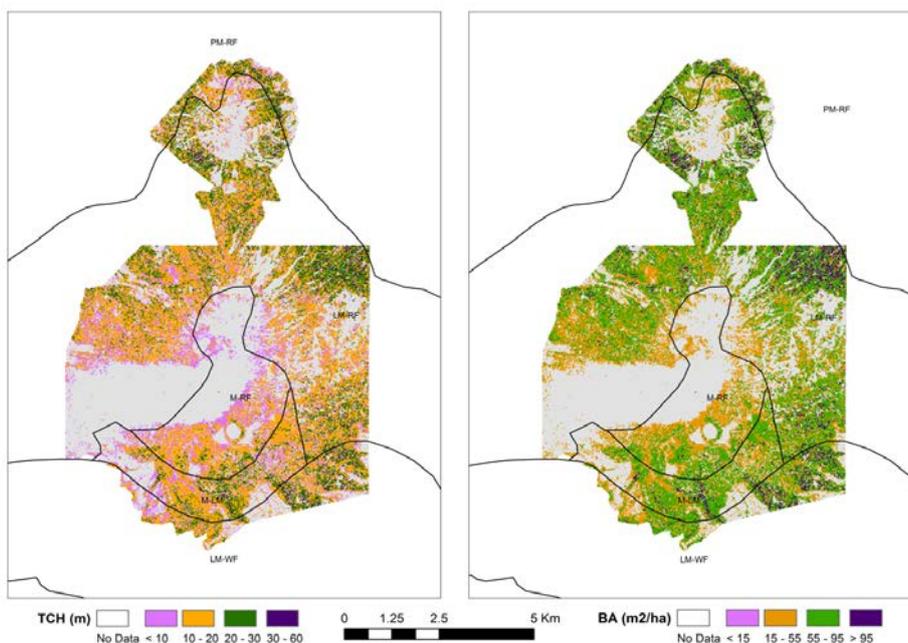


Figura 3. Cartografía de altura media de copas (TCH) y área basimétrica (G) del Parque Nacional Volcán Poás.

Debido a la extensión de las zonas ralas y de matorral, sobre todo en las cercanías del cráter y en los playones originados por coladas volcánicas, y para poder hacer una comparación real de la biomasa que almacenan las áreas boscosas por zonas de vida Holdridge, no se han tenido en cuenta las celdas con una TCH menor de 4.5m. Se han aplicado los modelos local y global para generar sendos mapas de AGB del P.N. Volcán Poás (Figura 4).

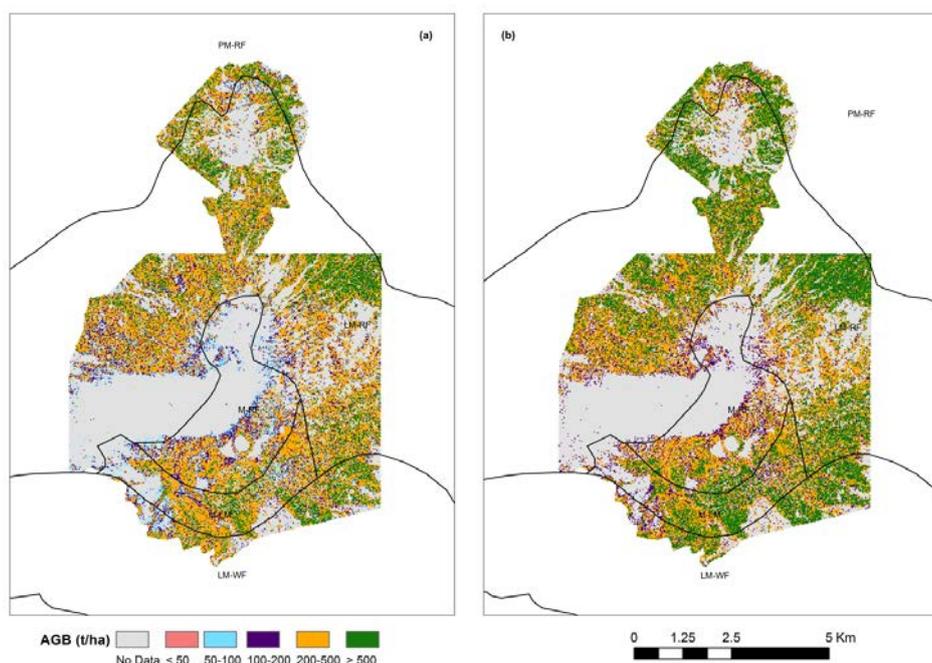


Figura 4. Cartografía de biomasa aérea (AGB) del Parque Nacional Volcán Poás usando a) la alometría de ASNER y MASCARO (2014) para un amplio rango de bosques tropicales y b) el modelo local generado para el área de estudio.

Ambos modelos producen mapas consistentes y lógicos en los que no hay grandes saltos en los resultados entre celdas vecinas, dando valores de biomasa dentro del rango de lo esperado para este tipo de bosques.

Se han obtenido valores medios de AGB en el área de estudio de 461.54 t ha^{-1} usando el modelo alométrico global y 409.35 t ha^{-1} con el modelo local. Se aprecia un gradiente en las existencias de biomasa a lo largo del Parque, dándose valores más elevados cuanto menor es la cota. Así la acumulación más baja de biomasa se ha obtenido en el bosque pluvial montano, que es el área que rodea al cráter y por tanto está situado a mayores altitudes. En cambio, los valores medios más altos de biomasa se han encontrado en el bosque pluvial premontano, el cual se encuentra en las cotas más bajas y recibe las mayores precipitaciones medias anuales del área de estudio puesto que se encuentra en la vertiente Pacífico del Parque.

5. Discusión

Los modelos estudiados son sencillos y con sentido biológico, en los que sólo intervienen tres variables, de las cuales dos de ellas son dependientes de la TCH. Esto es, intervienen los principales parámetros que definen la biomasa: altura, área basimétrica y densidad de madera. Los dos primeros definen la estructura tridimensional de la vegetación y el último aporta la cantidad de carbono acumulada por unidad de volumen.

El SC define la capacidad de almacenamiento de biomasa de los bosques. En el área de estudio este parámetro ($SC=3,70$) ha sido mayor que en los bosques estudiados por ASNER y MASCARO (2014) (1,13-2,58), lo que indica que el Poás tiene una mayor densidad de carbono que el resto de bosques tropicales analizados para una misma TCH. Los autores de este modelo sugieren que el SC puede ser utilizado con valores a nivel regional. Sin embargo, en este estudio parece que este coeficiente varió a escala local, pudiendo usarse un valor para cada zona de vida de Holdridge en el Parque. El bajo número de parcelas no permite concluir esta afirmación, por lo que se recomienda en futuros estudios una simple medición del área basimétrica con relascopio en más parcelas para obtener un mejor ajuste de este parámetro.

El aumento del RMSE en ambos modelos cuando se aplica la regresión TCH-G sugiere un mal ajuste entre estas variables debido al tamaño de las parcelas o a las diferencias de estructura de vegetación en las diferentes zonas de vida estudiadas. En este sentido, el alto RMSE del modelo global de ASNER y MASCARO en el área de estudio (40,63%) es debido al menor tamaño de parcela utilizado (0,04 ha) frente al utilizado en el desarrollo del modelo (0,1-1,0 ha). Un tamaño pequeño de parcela conduce a un mayor error debido a errores de muestreo de campo (RÉJOU-MÉCHAIN et al., 2014), e incrementa la influencia del efecto borde y el error de posicionamiento del GPS. Esto puede resultar en estimaciones de AGB y G imprecisas (MEYER et al., 2013; MAUYA et al., 2015).

El tamaño óptimo de las parcelas depende del tamaño típico de las copas de los árboles (ASNER y MASCARO 2014). Aumentando el tamaño de las parcelas (parcelas >0.5 ha) se consiguen tres beneficios importantes: (1) cuanto mayor es el número de árboles medidos más se mejora la precisión de la alometría conjunta de parcela, (2) el uso de parcelas de mayores dimensiones minimiza el efecto negativo producido por la baja precisión en la localización de la parcela por el GPS, y (3) como las copas pueden ser de grandes proporciones y superar los 20 metros de diámetro, es posible que las copas que aparecen en los datos LiDAR no pertenezcan a un pie incluido en la parcela de muestreo, produciendo efecto borde. Estos tres efectos pueden minimizarse aumentando el tamaño de parcela (MEYER et al., 2013) a costa de aumentar los costes de inventario.

Las parcelas de cerca de 1 ha pueden ser las más indicadas como se deduce de estudios en bosques tropicales donde la incertidumbre se reduce al 10 % cuando se utilizan parcelas de estas dimensiones (ASNER y MASCARO, 2014; ZOLKOS et al., 2013). MAUYA et al. (2015) observaron que el RMSE bajaba desde un 63,6% hasta un 29,2% cuando se aumentaba el tamaño de parcela desde 0,02 ha hasta 0,3 ha. El RMSE de este estudio es parecido al que reportan MAUYA et al. (2015) para un tamaño de parcela similar en modelos LiDAR de AGB a nivel de parcela en el norte de Tanzania.

En este tipo de bosques las copas de los árboles grandes en el dosel superior produce un aumento de los primeros retornos LiDAR registrados en los niveles superiores, no teniendo en cuenta los doseles inferiores (EDIRIWEERA et al., 2014). A este respecto, se ha demostrado ampliamente que la TCH es un buen predictor de la estructura forestal, la densidad de carbono y la biomasa en la vegetación tropical.

Se ha usado una resolución de 25x25-m, o lo que es igual, el mismo tamaño de celda que el utilizado para el procesamiento de los datos LiDAR, debido a que algunos autores indican que esta es una buena práctica (MAGNUSSEN y BOUDEWYN, 1998). Este tamaño de pixel es cercano a los 30x30-m que utilizan CLARK et al. (2011) y ASNER et al. (2012) que simulan una parcela de muestreo de biomasa típica utilizada en multitud de estudios para bosques tropicales (PHILLIPS et al. 1998).

La ecuación alométrica utilizada para estimar la AGB de cada árbol es la razón principal que explica el 11% de sobrestimación del modelo local frente al modelo global. Para el desarrollo del modelo para un amplio rango de bosques tropicales se priorizó el uso de ecuaciones alométricas basadas en datos locales y se midieron al menos 3 alturas por parcela para aplicar regresiones altura-

diámetro en los demás árboles. Es recomendable utilizar modelos alométricos locales cuando estos estén disponibles porque de esta forma las estimaciones de AGB van a ser más ajustadas a la realidad. Cuando no estén disponibles, su elaboración es un proceso caro y el uso de ecuaciones generales como la de CHAVE et al. (2005) es adecuado.

En la cartografía de AGB del área de estudio (Figura 4) se observa que la acumulación más baja de biomasa se ha obtenido en el bosque pluvial montano, que es el área que rodea al cráter y por tanto está situado a mayores altitudes. En cambio, los valores medios más altos de biomasa se han encontrado en el bosque pluvial premontano, el cual se encuentra en las cotas más bajas y recibe las mayores precipitaciones medias anuales del área de estudio (>4000 mm año⁻¹) puesto que se encuentra en la vertiente Pacífico del Parque. Este gradiente está acorde con el indicado en otros estudios sobre biomas en bosques tropicales (GIRARDIN et al., 2010, ULATE 2010, MOSER et al., 2011).

6. Conclusiones

Se han obtenido valores más altos de coeficiente de espesura (SC) que en los otros bosques estudiados por ASNER y MASCARO (2014). El área basimétrica es muy elevada en comparación con otras zonas, obteniéndose un valor medio de $58,50 \pm 13,04 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ en las parcelas inventariadas. Al ser esta una variable de gran influencia en la acumulación total de reservas de biomasa, hace pensar que este tipo de bosque juega un papel importante como sumidero de carbono, por lo que su conservación en este sentido es vital.

Se ha utilizado un valor constante de SC para estimar la biomasa aérea de todo el Parque Nacional Volcán Poás, aunque este parámetro podría variar en zonas más pequeñas que el área de estudio. Sin embargo, es necesario inventariar más parcelas de muestreo para demostrar que se cumple esta variabilidad.

Las diferencias en los resultados obtenidos mediante el modelo global y el local pueden ser debidas a las ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de la AGB de cada árbol. Una alternativa a esto es la construcción de ecuaciones alométricas específicas y locales. Esto genera un aumento importante de los costes, por lo que es necesario llevar a cabo un estudio económico para analizar cuál es la mejor opción.

La alternativa a los modelos locales es el uso de la aproximación universal de ASNER y MASCARO (2014) Este método supone una ventaja frente a los inventarios clásicos puesto que requiere de un menor esfuerzo en la toma de datos de campo y abarata los costes. La biomasa aérea se puede estimar únicamente el área basimétrica y generando una regresión a nivel local con la altura media de copas. Por este motivo es importante definir procedimientos de estimación de G en campo precisos (por ejemplo, ubicación, tamaño y forma de las parcelas de campo) para obtener resultados confiables en futuros estudios. Se ha confirmado la influencia del tamaño de la parcela en la regresión G-TCH, por lo que en futuros estudios se recomienda se recomienda levantar parcelas de mayores dimensiones.

7. Agradecimientos

Este trabajo recibió una bolsa de viaje de la Universidad Politécnica de Madrid para el transporte al área de estudio. Los autores agradecen al Dr. Javier Bonatti (Universidad de Costa Rica) el soporte, el acceso a los datos y el préstamo del material utilizado en el trabajo de campo.

8. Bibliografía

ASNER, G.P.; CLARK, J.K.; MASCARO, J.; GARCÍA, G.A.; CHADWICK, K.D.; ENCINALES, D.A.; PAEZ-ACOSTA, G.; CABRERA, E.; KENNEDY-BOWDOIN, T.; DUQUE, A.; BALAJI, A.; VON HILDEBRAND, P.; MAATOUG, L.; PHILLIPS, J.F.; KNAPP, D.E.; DÁVILA, M.C.; JACOBSON, J.; ORDÓÑEZ, M.F.; 2012. High-resolution Mapping of Forest Carbon Stocks in the Colombian Amazon. *Biogeosciences Discussions*, 9(3), 2683-2696.

ASNER, G.P.; MASCARO, J., 2014. Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric. *Remote Sensing of Environment*, 140, 614-624.

Asner GP, Mascaro J, Anderson C, Knapp DE, Martin RE, Kennedy-Bowdoin T, van Breugel M, Davies, S, Hall JS, Muller-Landau HC, Potvi C, Sousa W, Wright J & Bermingham E (2013). High-fidelity national carbon mapping for resource management and REDD+. *Carbon balance and management*, 8(1), 1-14.

ASNER, G.P., MASCARO, J., MULLER-LANDAU, H.C., VIEILLEDENT, G., VAUDRY, R., RASAMOELINA, M., VAN BREUGEL, M., 2012. A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping. *Oecologia*, 168(4), 1147-1160.

BOLAÑOS, R.; WATSON, V.; TOSI, J., 2005. Mapa ecológico de Costa Rica (Zonas de Vida), según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L.R. Holdridge), Escala 1:750 000. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica.

BONAN G.B., 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449.

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M.A.; CHAMBERS, J.Q.; EAMUS, D.; FÖLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, J.P.; NELSON, B.W.; OGAWA, H.; PUIG, H.; RIÉRA, B.; YAMAKURA, T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99.

CHAVE, J.; COOMES, D.A.; JANSEN, S.; Lewis, S.L.; SWENSON, N.G.; ZANNE, A.E., 2009. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters* 12(4): 351-366.

CLARK, M.L.; CLARK, D.B.; ROBERTS, D.A., 2004. Small-footprint lidar estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape. *Remote Sensing of Environment*, 91(1), 68-89.

CLARK, M.L.; ROBERTS, D.A.; EWEL, J.J.; CLARK, D.B., 2011. Estimation of tropical rain forest aboveground biomass with small-footprint LiDAR and hyperspectral sensors. *Remote Sensing of Environment*, 115(11), 2931-2942.

DRAKE, J.B.; DUBAYAH, R.O.; CLARK, D.B.; KNOX, R.G.; BLAIR, J.B.; HOFTON, M.A.; CHADZON, R.L.; WEISHAMPEL, J.F.; PRINCE, S., 2002. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. *Remote Sensing of Environment*, 79(2), 305-319.

EDIRIWEERA, S.; PATHIRANA, S.; DANAHER, T.; NICHOLS, D., 2014. LiDAR remote sensing of structural properties of subtropical rainforest and eucalypt forest in complex terrain in North-eastern Australia. *Journal of Tropical Forest Science*, 26(3), 397-408.

FAO, 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010 – informe principal. Estudio FAO: Montes Núm. 163. 381 pp. Roma, Italia.

FRANGI, J.L.; Lugo, A.E., 1985. Ecosystem dynamics of a subtropical floodplain forest. *Ecological Monographs*, 351-369.

GIBBS, H.K.; BROWN, S.; NILES, J.O.; FOLEY, J.A., 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2(4), 045023.

GIRARDIN, C.A.J.; MALHI, Y.; ARAGAO, L.; MAMANI, M.; HUARACA, W.; DURAND, L., 2010. Net primary productivity allocation and cycling of carbon along a tropical forest elevational transect in the Peruvian Andes. *Global Change Biology*, 16(12), 3176-3192.

HOUGHTON, R.A., 2005. Tropical deforestation as a source of greenhouse gas emissions. En: MOUTINHO, P.; SCHWARTZMAN, S. (eds.) *Tropical deforestation and climate change*, pp. 13-22 Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia and Environmental Defense Fund, Belém, Pará, Brazil.

IPCC, 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 104 pps. IPCC, Ginebra.

MAGNUSSEN, S.; BOUDEWYN, P., 1998. Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators. *Canadian journal of forest research* 28(7): 1016-1031.

MARTIN, A.R.; THOMAS, S.C., 2011. A reassessment of carbon content in tropical trees. *PLoS One*, 6(8), e23533.

MAUYA E.W.; HANSEN E.H.; GOBAKKEN T.; BOLLANDSÅS O.M.; MALIMBWI R.E.; NÆSSET E., 2015. Effects of field plot size on prediction accuracy of aboveground biomass in airborne laser scanning-assisted inventories in tropical rain forests of Tanzania. *Carbon balance and management*, 10:10.

MEYER, V.; SAATCHI, S.S.; CHAVE, J, DALLING, J.W.; BOHLMAN, S, FRICKER, G.A.; ROBINSON, C.; NEUMANN, M.; HUBBELL, S., 2013. Detecting tropical forest biomass dynamics from repeated airborne Lidar measurements. *Biogeosciences*, 10(8), 5421-5438.

MINISTERIO DE AMBIENTE, ENERGÍA Y TELECOMUNICACIONES (MINAET); FONDO FINANCIACIÓN FORESTAL (FONAFIFO), 2010. Propuesta para la preparación de readiness R-PP Costa Rica. Document presented to the Forest Carbon Partnership Facility of the World Bank, San Jose, Costa Rica.

MOSER, G.; LEUSCHNER, C.; HERTEL, D.; GRAEFE, S.; SOETHE, N.; IOST, S., 2011, Elevation effects on the carbon budget of tropical mountain forests (S Ecuador): the role of the belowground compartment. *Global Change Biology*, 17: 2211–2226.

PHILLIPS, O.L.; MAHLI, Y.; HIGUCHI, N.; LAURANCE, W.F.; NUÑEZ, P.V.; VÁZQUEZ, R.M.; LAURANCE, S.G.; FERREIRA, L.V.; STERN, M.; BROWN, S.; GRACE, J., 1998. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science* 282:439–42.

PIROTTI, F., 2011. Analysis of full-waveform LiDAR data for forestry applications: a review of investigations and methods. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 4(3), 100.

R CORE TEAM, 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [online 25 February 2015] URL <http://www.R-project.org/>

RÉJOU-MÉCHAIN, M.; MULLER-LANDAU, H.C.; DETTO, M.; THOMAS, S.C.; TOAN, T.L.; SAATCHI, S.S.; BROCKELMAN, W.Y., 2014. Local spatial structure of forest biomass and its consequences for remote sensing of carbon stocks. *Biogeosciences Discussions*, 11, 5711.

SEXTON, J.O.; BAX, T.; SIQUEIRA, P.; SWENSON, J.J.; HENSLEY, S., 2009. A comparison of lidar, radar, and field measurements of canopy height in pine and hardwood forests of southeastern North America. *Forest Ecology and Management*, 257(3), 1136-1147.

SOLÓRZANO, 1992. La Depreciación de los Recursos Naturales en Costa Rica y su relación con el Sistema de Cuentas Nacionales. Instituto de Recursos Mundiales (WRI). Centro Científico Tropical (CCT), San José, Costa Rica.

TIEPOLO, G.; CALMON, M.; FERETTI, AR, 2002. Measuring and Monitoring Carbon stocks at the Guaraquecaba climate action project, Parana, Brazil. In: Proceedings of the “International Symposium on Forest Carbon Sequestration and Monitoring” (Taiwan Forestry Research ed) 11-15 November 2002. Taipei, Taiwan, pp. 98-115.

ULATE, C.A., 2010. Análisis y comparación de la biomasa aérea de la cobertura forestal según zona de vida y tipo de bosque para Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica.

ZANNE, A.E.; LOPEZ-GONZALEZ, G.; COOMES, D.A.; ILIC, J.; JANSEN, S.; LEWIS, S.L.; MILLER, R.B.; SWENSON, N.G.; WIEMANN, M.C.; CHAVE, J., 2009 Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. Dryad Digital Repository.

ZOLKOS, S.G.; GOETZ, S.J.; DUBAYAH, R., 2013. A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using LiDAR remote sensing. *Remote Sensing and Environment*, 128, 289-298.