

Modelo de estimación del contenido de carbono sobre el suelo en bosque húmedo tropical de la Amazonía Occidental usando tecnología LiDAR aerotransportada

Patricio Xavier Molina⁽¹⁾, Mercedes Farjas Abadía⁽²⁾, Luis Alberto Sánchez Díez⁽²⁾ y Juan Carlos Ojeda Manrique⁽²⁾

⁽¹⁾ Instituto Geográfico Militar del Ecuador, Av. Seniergues E4-676 y Gral Paz y Miño, 170413, Quito-Ecuador. Email: xavier.molina@mail.igm.gob.ec

⁽²⁾ Universidad Politécnica de Madrid. C/ Ramiro de Maestu s/n, 28040, Madrid-España. Emails: m.farjas@upm.es, luisalberto.sanchez@upm.es, juancarlos.ojeda@upm.es

Resumen: La biomasa de los bosques tropicales juega un papel importante en el ciclo global del carbono: como depósito dinámico de carbono y como una fuente de dióxido de carbono a la atmósfera. La mayoría de inferencias acerca de la dinámica del bosque y del carbono en la Amazonía se basan en mediciones de árboles relativamente grandes en pequeñas parcelas muy dispersas, imposibilitando cuantificar a detalle la magnitud y variación espacial de la biomasa en estos bosques. El modelo aplicado en el estudio, se basa en una metodología publicada en trabajos anteriores en bosques tropicales. El análisis se apoya en información obtenida con tecnología LiDAR aerotransportada y datos de censo de una mega-parcela forestal de 50 ha, en el Parque Nacional “Yasuni” (PNY) en Ecuador. La metodología considera los hábitats topográficos, la distribución espacial de las parcelas de ajuste y validación en el diseño de muestreo y un modelo general para estimación de densidad de carbono. El modelo se ajusta usando técnicas de análisis de regresión lineal ($R^2=0,89$, $RMSE=8,67$ MgC ha⁻¹). Este enfoque metodológico hace posible calibraciones más precisas y permite cartografiar la distribución espacial de la biomasa sobre el suelo en alta resolución para una mejor estimación de las reservas de carbono en bosque tropical.

Palabras clave: LiDAR, biomasa forestal, densidad de carbono, bosque tropical.

Model estimation of above-ground carbon density in western Amazon tropical rainforests using airborne LiDAR

Abstract: The above-ground biomass of tropical forests plays an important role in the global carbon cycle: as a dynamic carbon reservoir and as a source of carbon dioxide into the atmosphere. Most inferences about forest dynamics and carbon stocks in the Amazon are based on measurements of relatively large trees in small widely dispersed plots. This makes it difficult to quantify the magnitude and spatial variation of biomass in these forests. Our study uses a methodology published in previous work for determining carbon stock in tropical forests. The analysis relies on information obtained from airborne LiDAR and census data from a mega-plot forest of 50 hectares in the “Yasuni” National Park (YNP) in Ecuador. The methodology examines topographic habitats, spatial distribution of the plots for adjustment and validation in the sampling design as well as a general model to for density estimation of carbon stock in above-ground biomass. The model is adjusted using linear regression analysis ($R^2 = 0.89$, $RMSE = 8.67$ Mg C ha⁻¹). This methodological approach enables more accurate calibrations and allows high resolution carbon mapping of the above-ground biomass in tropical forests.

Keywords: LiDAR, aboveground biomass, carbon density, tropical forest.

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales son importantes reservorios de carbono y biodiversidad, y la caracterización de la distribución espacial de su biomasa aérea (AGB) es un requisito previo para el entendimiento de la dinámica del ciclo de carbono en el tiempo. Se requieren estimaciones exactas de AGB y de los cambios en las existencias de carbono resultado de las actividades humanas para reducir las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación forestal (REDD +), para contribuir con los esfuerzos para la mitigación del cambio climático (Angelsen, 2008). En este marco, los bosques tropicales desempeñan un papel vital en el ciclo global del carbono, pero la cantidad de carbono que contienen y su distribución siguen siendo inciertas (Chave *et al.*, 2005). La tecnología LiDAR ha demostrado ser útil para estimar patrones de densidad de

carbono; sin embargo, la precisión y la generalidad de las calibraciones entre las predicciones de densidad de carbono sobre el suelo asistidas por LiDAR y las estimaciones basadas en técnicas de inventario de campo deben incrementarse a fin de hacer el cartografiado de carbono de los bosques tropicales más accesible (Asner & Mascaro, 2014). Las estimaciones de biomasa de los bosques tropicales están limitadas por el conocimiento de la alometría de árboles tropicales. Su extrema diversidad de especies en general impide que se desarrollen alometrias de especies específicas, por lo que generalmente se aplican relaciones generales. La precisión para el cálculo del stock de carbono depende de la disponibilidad de modelos alométricos fiables que permitan inferir la biomasa aérea de los árboles en bosque tropical a partir de datos de inventario forestal. Los resultados obtenidos por Réjou-Méchain *et al.* (2014), refuerzan la importancia de la topografía como un factor que debe ser tomado en cuenta en el diseño de

los inventarios forestales y las calibraciones cuando utilizamos sensores remotos. Esto sugiere que el muestreo en general, debe ser estratificado por hábitats topográficos. Una compilación de investigaciones publicadas sobre estimaciones de biomasa sobre el suelo usando LiDAR (Zolkos *et al.*, 2013), concluye que la incertidumbre se acerca al 10% cuando el tamaño de la parcela se aproxima a 1 ha. El objetivo de esta investigación es modelar la densidad de carbono sobre el suelo (ACD) en bosque tropical con alta diversidad florística usando LiDAR aerotransportado, partiendo de un modelo general de estimación de ACD planteado en estudios anteriores y analizar su aplicabilidad en bosque tropical amazónico occidental.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La zona de estudio es una mega-parcela de 50 ha localizada en 0° 41' de latitud Sur y 76° 24' longitud oeste, a una altitud entre los 215 y 248 m sobre el nivel del mar dentro del Parque Nacional "Yasuni" (Figura 1) en Ecuador. En este parque se concentra una proporción considerable de las especies existentes en bosques tropicales de la Amazonía occidental, convirtiéndolo en uno de los espacios naturales de más alta biodiversidad del mundo (Bass *et al.*, 2010). Dentro de la parcela se encuentran 2 ambientes topográficos característicos y dominantes: el valle y la colina.

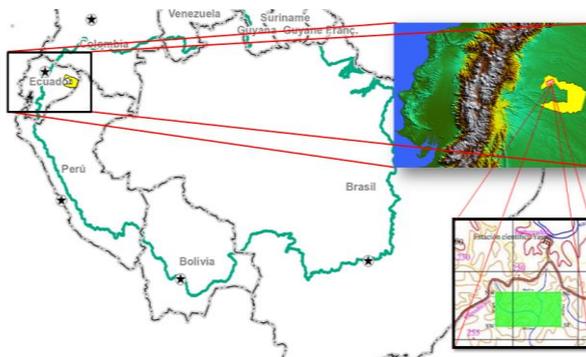


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio en la Cuenca Amazónica Occidental. Parcela de 50 ha (rectángulo de color verde) localizada en el Parque Nacional "Yasuni"- Ecuador (área color amarillo), mapa base (RAISG).

La elevación media del dosel en la parcela es de 18-25 m. También se encuentran árboles emergentes de hasta 40 m de altura y en escasas ocasiones árboles de 50 m de altura. Las especies de árboles pequeños dominantes en el sotobosque son de los géneros *Matisia* y *Rinorea*, mientras que las especies importantes de dosel son las *Iriartea deltoidea* y *Eschweilera coriácea* (Valencia *et al.*, 2004).

2.2. Censo forestal de la mega-parcela de estudio

El censo de la parcela de estudio fue realizado entre los años 2002 y 2010. La identificación de árboles siguió una metodología estandarizada utilizada en una red mundial de grandes parcelas forestales (Condit, 1998).

En estos trabajos, fueron etiquetadas, identificadas y localizadas todas las plantas leñosas ≥ 1 cm de diámetro de tallo. Valencia *et al.* (2004) identificaron todos los árboles en 25 ha de la parcela de estudio (1.104 morfoespecies) entre 152.353 individuos mientras que en las 50 ha se censaron 341.339 individuos. Para nuestro estudio, se dispuso de mediciones del diámetro del tronco a la altura de pecho de todos los individuos de la parcela de 50 ha, y datos de densidad de madera (gravedad específica) tomados de literatura especializada y de mediciones directas en el entorno de la parcela o áreas del PNY (Valencia *et al.*, 2009). En estos censos no se realizaron mediciones de alturas de los árboles debido al dosel denso y cerrado de la zona.

2.3. Levantamiento planimétrico de la parcela

Debido a las condiciones del dosel forestal (cerrado y estratificado), no se pudieron realizar mediciones directas con tecnología GNSS sobre la parcela. Fue necesario hacer un levantamiento planimétrico para determinar con precisión submétrica las coordenadas de las 4 esquinas de la parcela, de esta manera, relacionamos con la máxima exactitud la información del censo con los datos obtenidos con el sensor LiDAR aerotransportado. Para ejecutar el levantamiento planimétrico, se implantaron 4 vértices geodésicos que sirvieron de líneas base. Posteriormente, a partir de la red geodésica implantada, se realizaron las observaciones necesarias para calcular las coordenadas de las 4 esquinas de la parcela (tabla 1) usando una estación total.

Tabla 1. Coordenadas SIRGAS-ECUADOR UTM ZONA 18 Sur de las esquinas de la parcela de estudio.

Puntos GNSS	Este (m)	Norte (m)	Prec.(m)	Alt. elipsoidal
NW	343737,79	9924696,41	0,050	249,310
SW	343735,02	9924196,08	0,050	252,792
NE	344733,95	9924695,23	0,050	244,899
SE	344734,08	9924195,18	0,050	252,074

2.4. Adquisición y procesado de los datos LiDAR

Los datos LiDAR fueron capturados en mayo de 2014, la plataforma aérea utilizada fue una avioneta CESSNA 172 modelo Skyhawk. El sensor LiDAR emplazado fue un Optech ALT Gemini (tabla 2):

Tabla 2. Configuración del vuelo y del sensor LiDAR

Datos del vuelo		Configuración LiDAR	
Altitud (m)	781,25	Frec. repet pulso (khz)	166
Distancia entre líneas de vuelo (m)	203,89	Ángulo de escaneo	$\pm 15^\circ$
Solape transversal	50 %	Número de retornos	Hasta 4
Velocidad (m/s)	56,6	Densidad de ptos/m ²	19,4

A partir de la nube de puntos procesados, se generó el modelo digital del terreno (MDT) y el modelo digital de superficie (MDS) con una resolución espacial de 1x1 m usando LAsTools. Las métricas LiDAR de cada

subparcela de 1 ha fueron obtenidas usando el software FUSION/LDV.

2.5. Diseño de muestreo para el ajuste y validación del modelo general

El diseño de muestreo fue un cuadrículado regular de subparcelas de 1 ha que permitió capturar el rango de variación de la estructura forestal de la zona de estudio. La selección de las subparcelas para el ajuste (32) y validación (18), se basó en un muestreo estratificado por hábitats topográficos (Figura 2). Para el ajuste del modelo, se consideraron sólo los árboles ≥ 10 cm de diámetro a la altura de pecho (D). Los árboles < 10 cm (D) generalmente contribuyen con menos del 5% de la biomasa aérea total (AGB) en los bosques tropicales maduros (Chave *et al.*, 2003).

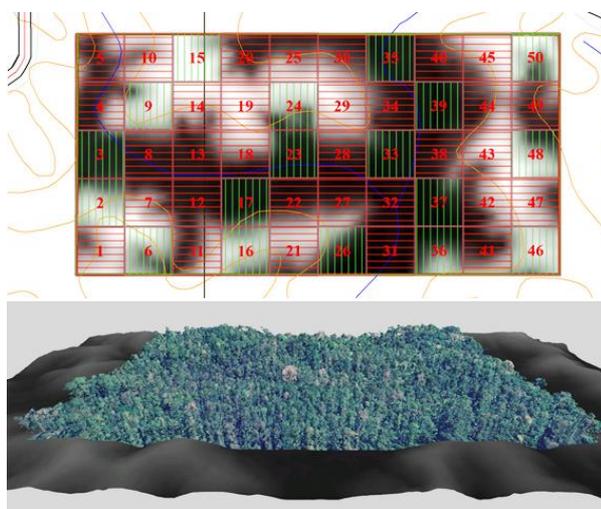


Figura 2. Sistema de cuadrículado regular de subparcelas de 1 ha e identificación de las parcelas para el ajuste (trama horizontal roja) y validación (trama vertical verde) y MDT con la nube de puntos LiDAR con color RGB de la parcela de estudio.

2.6. Planteamiento y ajuste del modelo

El enfoque de alometría conjunta de parcela para calibración con LiDAR propuesta por Asner *et al.*, (2012) y Asner & Mascaró (2014), sigue la teoría general de alometría de árbol (Chave *et al.*, 2005), y refleja las propiedades de la estructura forestal de la parcela completa en conjunto en lugar de las propiedades de cada organismo en particular. Este enfoque radica en un modelo universal simplificado (1) que demuestra que la biomasa seca de árboles y por lo tanto el contenido de carbono, que es el $\sim 48\%$ de la biomasa seca en peso (Martin & Thomas, 2011), puede estimarse a partir de mediciones de altura obtenidas a partir de los datos LiDAR y otras variables medidas en campo.

$$ACD = aTCH^{b1} BA^{b2} WD_{BA}^{b3} \quad (1)$$

Donde la densidad de carbono sobre el suelo (ACD) corresponde al valor de la biomasa estimada en campo

multiplicado por el factor 0,48. TCH es la altura promedio máxima del dosel obtenida con LiDAR, BA es el área basal medida en campo, y WD_{BA} es la densidad de la madera (promedio ponderado con respecto al área basal) para cada parcela.

El modelo “universal” se ajustó mediante regresión lineal múltiple por el método de mínimos cuadrados, transformando logarítmicamente las variables ACD, TCH, BA, y WD_{BA} . Se analizaron diferentes métricas descriptivas de alturas obtenidas a partir de los datos LiDAR y la información dasométrica de 32 subparcelas. La comparación entre los diferentes modelos ajustados se fundamentó en criterios estadísticos: Coeficiente de determinación R^2 que muestra la proporción de la varianza de la variable dependiente explicada por el modelo, el error medio cuadrático (RMSE) que determina la precisión de las estimaciones. Finalmente, para la validación del modelo se utilizaron las parcelas seleccionadas para tal efecto.

3. RESULTADOS

Luego de realizar la validación del modelo calculado, (figura 3), el modelo local incorporando TCH, BA y $WD_{PROMEDIO}$ explicó el 89% de la variación de la ACD. El resultado fue la siguiente ecuación (después de revertir el modelo, incluyendo el factor de corrección):

$$ACD = 2,1295 * TCH^{0,13274} BA^{1,2376} WD^{0,96703} \quad (2)$$

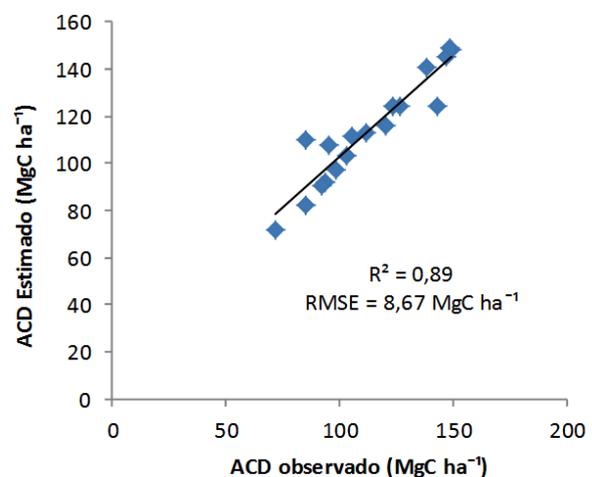


Figura 3. Comparación entre la densidad de carbono sobre el suelo (ACD) observada en campo y la estimada con LiDAR. La línea continua es la regresión lineal de los datos.

El modelo estimado recoge la variabilidad de la biomasa sobre el suelo de los 2 hábitats topográficos dominantes de la zona en conjunto: valle y colina. Se comprobó que existen diferencias hasta del 100% en los valores de biomasa aérea entre hábitats en una variación altitudinal de tan solo 33 m. Los resultados confirman las estimaciones realizadas por Valencia *et al.* (2009); esta variación de biomasa parece no sólo depender de factores biológicos como la altura, el área basal y la densidad de madera; sino también de la influencia del gradiente de elevación.

4. DISCUSIÓN

La metodología propuesta por Asner *et al.*, (2012; 2014), se fundamenta en el enfoque de alometría conjunta de parcela, y que se ve reflejada en un modelo “universal” simplificado para estimación de la densidad de carbono sobre el suelo. El modelo “universal” utiliza una sola métrica derivada de LiDAR para caracterizar la altura de la vegetación; mientras que el área basal y la densidad de madera se obtienen de trabajo de campo. El área basal puede también ser estimada gracias a la correlación existente con las métricas derivadas de LiDAR, pero su cálculo no se aborda en este artículo, y la densidad de madera promedio puede ser estimada utilizando datos de la literatura existente.

El enfoque de alometría conjunta usando LiDAR, puede facilitar el monitoreo de carbono de los bosques tropicales. Este método permite utilizar mediciones de área basal, las cuales pueden ser adquiridas en el campo (usando relascopio), y estimaciones de la densidad de madera de las especies dominantes dentro de la franja de vuelo LiDAR. Sin embargo, establecer parcelas grandes (1 ha) para la calibración, como el caso de estudio, son costosas y requieren de mucho tiempo. Encontrar un equilibrio entre el tamaño y el número de parcelas necesarias para calibraciones precisas, es un tema importante a considerar.

En este estudio, se analiza la capacidad de predicción del modelo general, y se comprueba que el enfoque propuesto se puede aplicar en una zona con alta diversidad. La parcela de estudio se encuentra localizada en 2 ecosistemas en la Amazonía ecuatoriana: bosque siempre verde de tierras bajas del Napo-Curaray y bosque inundado de la llanura aluvial de la Amazonía. El modelo obtenido es aplicable para estimar el contenido de carbono en estos dos ecosistemas específicos en el bosque tropical amazónico occidental.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico recibido del Gobierno de la República del Ecuador a través de la SENESCYT, al Instituto Geográfico Militar del Ecuador, al Dr. Renato Valencia, Director del Proyecto “Dinámica del bosque del Yasuni”, de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, y al Ministerio del Ambiente del Ecuador por el permiso otorgado para trabajar en el Parque Nacional “Yasuni”.

6. BIBLIOGRAFÍA

Angelsen, A. (ed.) 2008. *Moving ahead with REDD: issues, options and implications*. CIFOR, Bogor, Indonesia.

Asner, G. P., Mascaro, J., Muller-Landau, H.C., Vieilledent, G., Vaudry, R., Rasamoelina, M., Hall, J.S., & van Breugel, M. 2012. *A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping*. *Oecologia*, 168(4), 1147–1160.

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.

Bass, M.S., Finer, M., Jenkins, C. N., Kreft, H., Cisneros-Heredia, D. F., McCracken, S.F., Pitman, N., English, P. H., Swing, K., Villa, G., Di Fiore, A., Voigt, C.C., & Kunz, T.H. 2010. *Global conservation significance of Ecuador's Yasuni National Park*. *PloS One*, 5(1), 1–22.

Chave, J., Condit, R., Lao, S., Caspersen, J.P., Foster, R.B., & Hubbell, S.P., 2003. *Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: results from a large census plot in Panama*. *Journal of Ecology*, 91(2), 240–252.

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, 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.

Condit, R. 1998. *Tropical forest census plots*. Springer-Verlag, Berlin.

Martin, A. R. & Thomas, S. C. 2011. *A reassessment of carbon content in tropical trees*. *PloS One*, 6(8), e23533.

Réjou-Méchain, M., *et al.* 2014. Local spatial structure of forest biomass and its consequences for remote sensing of carbon stocks. *Biogeosciences Discussions*, 11, 5711–5742.

Valencia, R., Foster, R. B., Villa, G., Condit, R., Svenning, J., Hernández, C., Romoleroux, K., Losos, E., Magård, E., & Balslev, H. 2004. *Tree species distributions and local habitat variation in the Amazon: large forest plot in eastern Ecuador*. *Journal of Ecology*, 92(2), 214–229.

Valencia, R., Condit, R., Muller-Landau, H.C., Hernandez, C., & Navarrete, H. 2009. *Dissecting biomass dynamics in a large Amazonian forest plot*. *Journal of Tropical Ecology*, 25(05), 473.

Zolkos, S., Goetz, S.J., Dubayah, R. 2013. *A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing*. *Remote Sensing of Environment*, 128, 289–298.