

Estimación de biomasa aérea en Colombia a partir de imágenes MODIS

Aerial biomass estimation in Colombia based on MODIS images

J. A. Anaya^{1,2}, E. Chuvieco² y A. Palacios³
jesus.anaya@alu.uah.es

^{1,2} *Ingeniería Ambiental, Universidad de Medellín, Carrera 87 N° 30 - 65 • Medellín - Colombia*

² *Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, Colegios 2, 28801 Alcalá de Henares, España.*

³ *Departamento de Silvopascicultura, E.T.S.I Montes. Universidad Politécnica de Madrid, España.*

Recibido el 10 de Enero de 2008, aceptado el 17 de Septiembre de 2008

RESUMEN

Se propone un método para aumentar el nivel de detalle en estimaciones regionales de biomasa aérea basado en productos MODIS y mediciones de biomasa aérea en campo. El área de estudio se delimita entre 10 grados norte y 3 grados sur con un área de 1,139,012 km² correspondiente al área continental de Colombia. La vegetación se clasificó en pastizales, bosques secundarios y bosques primarios con el fin de mejorar las estimaciones. Se utilizó como variable explicativa de biomasa en bosques primarios y bosques secundarios la proporción de arbolado por píxel de MOD44 (VCF) siguiendo una relación exponencial, mientras que el índice de vegetación EVI (MOD13A1) se utilizó como variable explicativa de biomasa en pastizales siguiendo una relación lineal. La biomasa aérea en pastizales es altamente dinámica en el tiempo y por tanto se estimó su variación con intervalos de 16 días para el año 2004. Por su parte los bosques secundarios tienen una dificultad adicional al no poder separarse de los bosques primarios con el producto MOD44 (VCF) y presentar valores de biomasa muy inferiores, por lo que se utilizaron mapas auxiliares de vegetación. Los intervalos de confianza de la regresión exponencial aumentan al aumentar la biomasa por tanto la incertidumbre es muy alta para la biomasa total: entre 3,473 y 23,693 millones de toneladas con una media de 16,467. Sin embargo la diferencia de los resultados con estudios previos es mínima.

PALABRAS CLAVE: Biomasa, Trópico, Modis, VCF, EVI.

ABSTRACT

This paper presents a method to increase level of detail for above ground biomass estimates at a regional scale. The methodology and materials are based on MODIS products and field measurements corresponding to the continental area of Colombia, covering from 4 degrees south up to 12 degrees north of the Equator with a total of 1,139,012 km². Vegetation was classified in three broad classes: grasslands, secondary forests and primary forests which have been proved to enhance biomass estimates. MOD44 (VCF) was used as explanatory variable for primary and secondary forests following an exponential relationship, while EVI (MOD13A1) was used as explanatory variable for grasslands following a linear relationship; biomass for this vegetation class was estimated every 16 days given its large variation throughout the year. Vegetation maps were used to separate primary forests from secondary forest, since the latter shown lower biomass levels. Despite the uncertainty our biomass results are within the estimates of previous studies. Confidence intervals of the exponential regression are larger as the biomass values increases, for this reason the uncertainty is quite high ranging from 3,473 to 23,693 millions of tons with a mean of 16,467.

KEYWORDS: Biomass, Tropics, Modis, VCF, EVI.

INTRODUCCIÓN

La información de biomasa terrestre es importante para varios tipos de estudios, entre ellos cabe destacar los inventarios de sumideros de CO₂, la productividad primaria neta de la vegetación fotosintética y el efecto de los incendios en el balance de Carbono. Este último punto ha sido de particular importancia en la implementación del protocolo de Kyoto dentro del contexto de la Convención del Cambio Climático de las Naciones Unidas. En el último informe del Panel Intergubernamental en Cambio Climático de Naciones Unidas (IPCC, 2007), se insiste en la importancia de determinar una línea base de carbono orgánico. Este protocolo ha convertido al carbono en una materia prima y la capacidad de la vegetación de absorberlo en un recurso con futuros beneficios económicos (Cihlar, 2007). Ello requiere desarrollar métodos científicos (modelos contables e inventarios) que permitan la cuantificación confiable de las pérdidas y ganancias del CO₂ atmosférico, el monitoreo de las existencias y la predicción de las emisiones futuras (DeFries *et al.*, 2002; Herold *et al.*, 2006; Moutinho y Schwartzman, 2005).

Los estudios regionales en estimación de biomasa y productividad pueden clasificarse en tres grandes grupos según el tipo de vegetación: bosques primarios, bosques secundarios y sabanas; esto debido a que existe una fuerte relación entre la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas (Keeling y Phillips, 2007). La biomasa aérea de una sabana se modifica muy rápidamente (en el plazo de pocas semanas), especialmente cuando tiene uso ganadero y está fuertemente influenciada por las precipitaciones (Baruch, 2005; Menaut *et al.*, 1991; Privette *et al.*, 2002; San Jose y Montes, 2007; Scanlon *et al.*, 2005). Por otro lado los cambios en biomasa aérea de un bosque secundario son solo relevantes en términos interanuales, Sierra *et al.*, (2007) proponen una ecuación para bosques secundarios donde se estima la biomasa en función de la edad, en este estudio los bosques secundarios tienen una media de 46 ton/ha y estiman que su biomasa aumentará hasta llegar a un comportamiento asintótico igual a 249 ton/ha en un período aproximado de 50 años. Finalmente el aumento en biomasa aérea de un bosque primario tiende a cero dado que su biomasa potencial es igual a su biomasa real (Scheller y Mladenoff, 2004), por lo tanto son considerados como importantes reservas de carbono pero sin capacidad de aumento en biomasa viva, la biomasa muerta bien puede ser reutilizada por la vegetación viva, incorpo-

rada al SOC (Soil Organic Carbon) ó transportada fuera de los ecosistemas por los ríos.

MEDICIÓN DE BIOMASA EN BOSQUES TROPICALES

Las mediciones de biomasa son indispensables para estimar la reserva de Carbono en las plantas, pero solo puede ser obtenida directamente utilizando métodos destructivos siendo mucho más compleja su adquisición en bosques que en pastizales. En el caso de los bosques se requiere cortar los árboles, palmas y lianas, secar grandes volúmenes de madera y posteriormente pesar varias toneladas del material vegetal fraccionado. Con el fin de disminuir la dificultad de estos procesos se generan ecuaciones alométricas a partir de las mediciones directas, siendo la biomasa la variable dependiente y la altura, el diámetro a la altura de pecho y la densidad de la madera las variables independientes. La altura y el diámetro pueden medirse con mayor facilidad en campo, mientras que la densidad se obtiene a partir de muestras de madera a las que se les mide su volumen y peso seco en el laboratorio.

Las ecuaciones alométricas reportadas en la literatura muestran que el comportamiento de la biomasa no es lineal en función del diámetro por individuos, como tampoco lo es en función de las frecuencias diamétricas por rodal. Estas consideraciones resultarán de interés al establecer la relación entre biomasa y datos obtenidos por teledetección. Aunque en la Tabla 1 se presentan las ecuaciones alométricas en su forma exponencial son originalmente reportadas como transformaciones logarítmicas.

Aquí es importante anotar que un ajuste exponencial implica una alta heterocedasticidad, es decir que la varianza aumenta al aumentar la variable independiente, sin embargo la transformación logarítmica resulta en una infraestimación de la variable dependiente para cualquier valor de la variable independiente (Orrego y Del Valle, 2001).

MEDICIÓN DE BIOMASA EN SABANAS

Otra formación vegetal de gran relevancia en la zona de estudio son las Sabanas Tropicales, no tanto por la magnitud en sus valores de biomasa sino por la gran extensión que cubren y su dinámica intra-anual. En Colombia se encuentran importantes formaciones de Sabana, al Norte principalmente en los

Ecuación	Área	Referencia
$Y=21.29-6.95(D)+0.74(D^2)$	Bosque húmedo, Costa Rica	(Clark y Clark, 2000)
$Y=0.137*D^{2.32}$	Bosque seco, India	(Brown, 1997)
$Y=0.119*D^{2.53}$	Bosque húmedo, India	(Brown, 1997)
$Y=0.105*D^{2.46}$	Bosque húmedo, Colombia	(Orrego y Del Valle, 2001)
$Y=0.107*D^{2.42}$	Bosque húmedo secundario, Colombia	(Orrego y Del Valle, 2001)
$Y1=\exp\{0.37+0.33*\ln(D)+0.93*\ln(D)^2-0.122*\ln(D)^3\}$	Bosque muy húmedo, Amazonia Central	(Nascimento y Laurance, 2002)

Y: biomasa por árbol (kg)

Y1: biomasa (ton/ha)

D: diámetro a la altura de pecho (cm)

Tabla 1. Relaciones alométricas para bosques tropicales

valles del Río Magdalena y al Oriente en los afluentes del Río Orinoco. Los estudios de vegetación más relevantes en esta zona han sido realizados por Rippstein *et al.*, (2001), Jiménez *et al.*, (1998) y San Jose y Montes (2007). La explicación para que se presenten estas formaciones incluye las temporadas de bajas precipitaciones, el contenido de nutrientes, la competencia entre pastizales, el efecto del fuego, los herbívoros y la regeneración de especies arbóreas. Tanto Rippstein (2001) en Colombia como Scurlock *et al.*, (2003) en Venezuela han permitido determinar la biomasa intra-anual con máximos entre 3 y 4 ton/ha sin aplicar tratamientos de fertilización. La dinámica fenológica de los Llanos está asociada a las lluvias con un fuerte crecimiento desde los valores mínimos asociados a la época seca hasta alcanzar valores máximos (con tendencia asintótica) alrededor de los 7 meses.

APROXIMACIÓN A LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA CON DATOS SATELITALES

Recientemente se están relacionando las mediciones de campo de biomasa con datos obtenidos por teledetección. Una alta correlación entre datos de biomasa medida en campo y datos obtenidos mediante teledetección permitiría estimar la biomasa en el ámbito regional. Desafortunadamente los estimados regionales de biomasa son extremadamente variables en el espacio resultando en altos valores de incertidumbre, Houghton (2001b) encontró que la biomasa aérea subterránea y muerta para grandes extensiones geográficas como la Amazonia brasileña varían por más de uno o dos factores, desde el más bajo de 78 mil millones de toneladas hasta el más

alto de 186 mil millones de toneladas.

La biomasa es una característica tridimensional de la estructura de la vegetación y ha sido estimada con los sensores ópticos más populares, como Landsat y Spot. Sin embargo la capacidad de estos sensores se encuentra limitada solamente a dos dimensiones, es decir al aspecto superior de los pastizales o la cobertura de hojas del dosel. Varios estudios han resaltado fuertes correlaciones entre la biomasa y la reflectividad del infrarrojo medio para bosques jóvenes o con bajos valores de biomasa, de hecho las correlaciones son débiles o inexistentes en bosques con edades superiores a 15 años (Drake *et al.*, 2002) o superiores a 150 ton/ha (Steininger, 2000). Más recientemente se han buscado otras alternativas utilizando derivados de la parte óptica del espectro como los índices de vegetación o los mapas de fracción de cobertura vegetal para estimar la biomasa en el ámbito regional.

Algunos estudios han utilizado los IV para estimar biomasa. Zhang *et al.* (2005) demostró en estudios de soya que el índice de área foliar y la biomasa aérea tienen una altísima correlación con los índices de vegetación utilizando funciones potenciales y funciones exponenciales. Dong *et al.* (2003), correlacionó el verdor de la vegetación de zonas templadas con inventarios de campo de biomasa para series de tiempo largas, el NDVI utilizado en las regresiones es el acumulado en la época de crecimiento promedio para un período de 5 años. Wessels *et al.*, (2006) analizaron la relación entre la sumatoria de NDVI durante el período de crecimiento y la biomasa en herbáceas utilizando 533 parcelas, en este estudio se prestó especial atención a la heterogeneidad de las coberturas aledañas a los sitios de muestreo como la existencia de árboles o vegetación de ribera, por ello se realizaron observaciones detalla-

das con imágenes Landsat en un radio de 700 metros alrededor de los sitios de muestreo y se excluyeron del análisis parcelas con alta heterogeneidad.

La mayor limitación en estimar biomasa con IV es la saturación cuando los valores son altos, es decir en zonas boscosas (Myneni *et al.*, 2001; Unsalan y Boyer, 2003) Huete *et al.*, (1997) analizaron varios Índices de Vegetación con el fin de evaluar su sensibilidad ante altos y bajos valores de biomasa, los índices evaluados fueron NDVI, SAVI, EVI y el cociente simple IRC/Rojo. Estos índices se formulan en términos de reflectividades donde ρ_{IRC} , ρ_R y ρ_A corresponden a las bandas del Infrarrojo Cercano, Rojo y Azul respectivamente y pueden ser calculadas con la información de cualquier sensor (Vegetation ó ETM+, MODIS), excepto en el caso de EVI dado que este índice esta calibrado exclusivamente para MODIS.

$$NDVI = (\rho_{IRC} - \rho_R) / (\rho_{IRC} + \rho_R)$$

Donde,

NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*

ρ_{IRC} y ρ_R : Reflectividad en la banda del Infrarrojo Cercano y del Rojo.

$$SAVI = [(\rho_{IRC} - \rho_R) / (\rho_{IRC} + \rho_R + L)] * (1 + L)$$

Donde,

SAVI: *Soil Adjusted Vegetation Index*

L: Ajuste a una reflectividad promedia de fondo

$$EVI = G * [(\rho_{IRC} - \rho_R) / (C1 + \rho_{IRC} + C2 * \rho_R - C3 * \rho_A)]$$

Donde,

EVI: *Enhanced Vegetation Index*

ρ_A : Reflectividad en la banda del Azul

C1 = 1.0, Factor ajustado para suelo desnudo

C2 = 6.0, Coeficiente de resistencia atmosférica

férica

C3 = 7.5, Coeficiente de resistencia atmosférica

G = 2.5, *Gain factor*:

En el estudio citado, Huete y colaboradores encontraron que la estructura de la ecuación NDVI era la principal causa de saturación ante altos contenidos de biomasa, mientras que EVI y SAVI eran sensibles en estas condiciones atribuyendo al IRC la alta capacidad de penetración. En un estudio posterior (Huete *et al.*, 2002) solo evaluaron NDVI y EVI en bosques secos, bosques tropicales y sabanas, encontrando nuevamente saturación de NDVI en regiones de alta biomasa mientras que EVI permanecía sensible a las variaciones del dosel.

RADAR Y LIDAR

La información obtenida por radar también tiene saturación en rangos altos de biomasa pero a niveles más altos que los encontrados en óptico. En la amazonía colombiana Quiñónez (2002) encontró que la banda P-asociada a la mayor longitud de onda y por ende a una mayor penetración en el dosel- se satura alrededor de las 150 ton/ha. En este mismo estudio se establecieron 23 parcelas de 1000 m², así: 5 parcelas de pasto, 10 parcelas de bosque secundario y 13 parcelas de bosque primario, agrupadas en 15 clases estructurales con el fin de estimar biomasa en la amazonía colombiana. En este estudio se encontró con una exactitud del 68.9% que la biomasa variaba entre 2.9-10 ton/ha para pastizales, 6-159 ton/ha para bosques secundarios y 137-297 ton/ha para bosques primarios. Las bandas y longitudes de onda utilizadas en este trabajo fueron:

Banda	Longitud de onda (cm)
X	3
C	5.6
L	24
P	65

Más recientemente se han utilizado sensores LIDAR (*Light Detection and ranging*). Los estimados de biomasa con Lidar han demostrado la gran variabilidad para diferentes ecosistemas forestales: 200 ton/ha al Nor-este de Costa Rica, La Selva (Drake *et al.*, 2002); 400 ton/ha en Colorado Front Range USA (Hall *et al.*, 2005) y 1300 ton/ha en los bosques de coníferas en el Nor Oeste de los Estados Unidos (Means *et al.*, 1999). Este último demostrando su habilidad de hacer estimaciones ante altos valores de biomasa.

OBJETIVOS

Los estudios previos de mediciones de biomasa en Colombia citados en este documento son extremadamente detallados y locales (a nivel de parcelas) cubriendo pequeñas superficies o bien, extremadamente generales con datos tabulares o con píxeles mayores a medio grado (FAO, 2005; Olson *et al.*, 1985; Olson *et al.*, 2003). La meta de este trabajo es aumentar el nivel de detalle en la distribución espacial de la biomasa en el ámbito regional, esto permitirá mejorar los análisis cuantitativos en los cambios de biomasa, especialmente en aquellos casos asociados a la ocurrencia de incendios. Adicionalmente se busca reunir esfuerzos aislados en mediciones de biomasa en campo en Colombia y países limítrofes e incorporarlos dentro de un contexto regional con datos obtenidos por teledetección.

Como objetivo fundamental se busca obtener un mapa de la distribución espacial de la biomasa para el área continental de Colombia utilizando datos MODIS e información de campo con resolución de 500 m, esto permite mejorar la resolución espacial de estudios previos como los de Olson *et al.* (2003) 50 km, o van der Werf *et al.* (2004) 111 km. Se espera que a mayores valores de IV y fracción de vegetación de arbolado VCF exista una mayor cantidad de biomasa aérea. Se seleccionan los productos MODIS como fuente de datos para conformar las variables explicativas de la biomasa por su bajo costo, amplia documentación, resolución y cobertura global.

ÁREA DE ESTUDIO

Colombia se encuentra en la zona tropical siendo cruzada al sur por la línea del ecuador y a 72 grados Oeste del Meridiano de Greenwich. Se divide en 5 regiones: Andina, Amazónica, Pacífica, Caribe y

Orinoquía. Es el único país suramericano con costas en el océano Pacífico y el mar Caribe, en cuanto al relieve tiene llanuras hacia la costa norte y hacia el oriente en la cuenca del Río Orinoco, su máxima altura alcanza los 5,800 m en la Sierra Nevada de Santa Marta con nevados de menor altura en la cordillera de los Andes.

Los países limítrofes son Ecuador, Venezuela, Brasil, Perú y Panamá.

MATERIALES Y METODOLOGIA

DATOS MODIS

El sensor MODIS *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* fue lanzado a bordo del satélite Terra en 1999, seguido en 2002 por el satélite Aqua, ambos parte del programa EOS de NASA. Su objetivo es proveer series de observaciones globales de la atmósfera, los océanos y la tierra <http://modis.gsfc.nasa.gov/>. Este sensor tiene 36 canales en el dominio óptico térmico, y resoluciones espaciales entre 250 m y 1 km. Las imágenes originales se descargaron siguiendo los cuadrantes estándar (Tiles: figura 1) del sistema MODIS y se re proyectaron a UTM (Huso18) utilizando como elipsoide de referencia el WGS84.

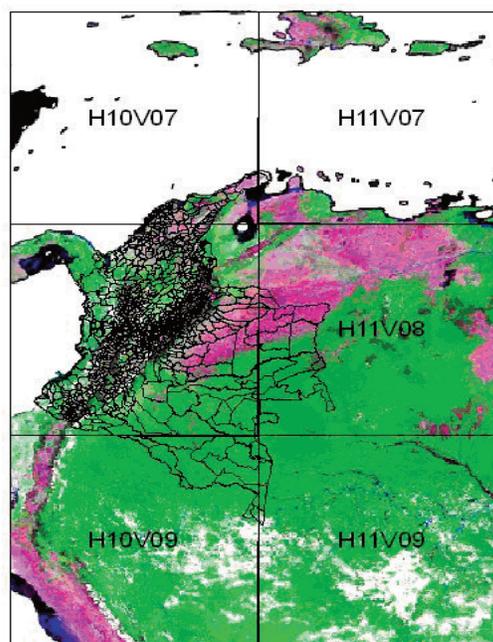


Figura 1. Sistema de referencia MODIS para Colombia. Extensión geográfica de las ventanas H10V07, H11V07, H10V08, H11V08, H10V09, H11V09. Que cubren toda el área continental del país

La Tabla 2 lista los productos estándar MODIS que fueron considerados para este proyecto. El producto seleccionado es el compuesto MOD13A1 cuya serie de 16 días permite eliminar una gran cantidad de nubes y su píxel de 500 m tiene un nivel de detalle adecuado para el área de estudio y los objetivos propuestos. Los compuestos han resultado de gran utilidad en estudios previos para disminuir el volumen de datos y seleccionar los píxeles de mejor calidad (Mayaux *et al.*, 2003; Schwarz *et al.*, 2004) Por otro lado siguiendo los resultados de Huete *et al.*, (2002) se optó por la selección del EVI como variable explicativa a ser correlacionada con la biomasa.

MOSAICOS, REMUESTREOS Y CONTROL DE CALIDAD

Para este trabajo se procesaron 28 compuestos de 16 días, que comprenden desde el 2 de diciembre de 2003 hasta el 6 de febrero de 2005. Se utilizaron herramientas facilitadas por el centro de datos MODIS (DAAC, 2004) para extraer los datos de calidad por píxel que incluye el producto estándar MOD13. Se utilizaron solo aquellos que no mostraban problemas de nubes o radiometría defectuosa. Los píxeles marcados con baja calidad fueron reemplazados luego mediante interpolaciones con los compuestos adyacentes t_{-1} y t_{+1} . Una vez corregidos los píxeles de baja calidad se aplicaron medias móviles de cuatro periodos a toda la serie de tiempo para disminuir el ruido.

MAPAS DE FRACCIÓN VEGETAL

Adicionalmente a los índices de vegetación para explicar la distribución de la biomasa se incluyó un Mapa de Fracción vegetal. Dentro de los mapas de fracción vegetal citados en el ámbito científico resalta el mapa obtenido a partir de AVHRR analizado por DeFries *et al.* (2000) y más recientemente el

mapa obtenido a partir de MODIS denominado VCF (Hansen *et al.*, 2002) Este último es un producto en formato de celdas que consta de tres capas: arbolado, herbazales y suelo desnudo donde para cada posición la suma de tres píxeles será de 100%. Un alto contenido de arbolado debe estar asociado a mayores valores de biomasa, mientras que un alto contenido de herbazales debe estar asociado a valores bajos. De esta forma se seleccionó el producto MODIS-VCF para ser correlacionado con valores de biomasa medida en campo. Específicamente se seleccionó la capa VCF-arbolado, en adelante VCFa donde cada píxel representa la proporción de arbolado por píxel, se descarta la utilización de las otras dos capas como variables explicativas por su multicolinealidad. La colección 3 VCF de 2001 fue obtenida de <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/vcf/> y ha sido validada de forma exitosa en los trópicos en estudios anteriores (Hansen *et al.*, 2002; Hansen *et al.*, 2003) considerándose muy superior en nivel de detalle sobre versiones anteriores.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Con el fin de estratificar los bosques primarios y secundarios se utilizó el mapa de Uso del Suelo elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC (Hacienda-IGAC, 1985). Este mapa tiene formato vectorial de polígonos, y ha sido generado por el conocimiento de expertos con técnicas de interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite. El nivel de detalle corresponde a 1:1,500,000 y consta de 24 categorías.

INFORMACIÓN DE CAMPO

Los estimados de biomasa en campo para bosques en diversos estados sucesionales se basa en relaciones alométricas definidas por cada autor para su propia zona de estudio con tamaños de parcelas que

Nombre	Sensor	Producto	Longitud	Resolución
MOD09A1	Terra	Reflectividad	8 días	500 m
MOD13A1 ⁽¹⁾	Terra	EVI	16 días	500 m
MCD43B4	Terra + Aqua	Reflectividad	16 días	1000 m

⁽¹⁾Para este trabajo el EVI se escaló por 10,000 de cara a evitar números reales.

Tabla 2. Características principales de los datos Modis considerados.

varían desde las 0.01 ha hasta 0.1 ha.

Saldarriaga (1998) ajustó ecuaciones alométricas de forma particular para tres rangos diamétricos a la altura del pecho (DAP cm): 1-5, 5-20 y mayor de 20 cm. Según el caso considera tres variables independientes: diámetro a la altura del pecho, densidad de la madera y altura de cada árbol. Encontró que los máximos valores de biomasa para bosques primarios podían cuadruplicar los valores mínimos para bosques intervenidos en la misma zona de vida, estos últimos variando entre 44 y 189 ton/ha. Lovelock (2005) también observó una alta variación en biomasa con valores entre 6.8 ton/ha hasta 194.3 ton/ha dentro del mismo ecosistema demostrando que la estructura de los bosques de Manglares en Panamá estaba directamente relacionada con su posición fisiográfica con respecto al mar. Por otro lado los cambios en producción de biomasa en los pastizales pueden variar en función de tratamientos de fertilización, la introducción de nuevas especies, el tipo de suelo o las variaciones intra-anales de la precipitación. Rippstein *et al.* (2001) reportan valores entre 5.7 a 8.9 ton/ha en los pastizales de los llanos de Venezuela ante distintos tratamientos de fertilización, y valores entre 0.6 y 5 ton/ha para la biomasa en los llanos Orientales de Colombia después de la quema y después de la época de lluvias respectivamente. Esta información para pastizales fue obtenida a partir de muestras de vegetación utilizando marcos de 2.5 m² (Rippstein *et al.*, 2001).

La Tabla 3 lista la información de 44 parcelas en Colombia, Panamá y Venezuela en pastizales, bosques secundarios (desde matorral hasta estados sucesionales avanzados) y bosques primarios, para estos últimos se utilizan ecuaciones alométricas (Benitez y Serna, 2004; Brown, 1997; CORNARE, 2002; DAAC, 2002; Houghton *et al.*, 2001a; Orrego y Del Valle, 2001; Quiñones, 2002; Rippstein *et al.*, 2001; Saldarriaga *et al.*, 1998)

MODELO DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA

La biomasa fue considerada como estática a pesar de sus ganancias por procesos fotosintéticos y sus pérdidas por muerte y extracción de material vegetal; todos muy difíciles de cuantificar en una escala temporal tan corta. Se ajustaron regresiones simples, múltiples y exponenciales donde en cada caso

se evaluaron los estadísticos para evaluar la significancia de las variables. Dos variables explicativas basadas en teledetección fueron incluidas: el Índice de Vegetación EVI y el VCFa, asumiendo que una mayor proporción de arbolado por píxel o altos valores del índice de vegetación estén asociados a mayores valores de biomasa. La variable dependiente es la biomasa medida en campo (B) y expresada en ton/ha, se constató con imágenes Landsat que el tipo de vegetación de la parcela correspondiera a un píxel puro de 500m.

El modelo lineal utilizado es del siguiente tipo:

$$B = a + b \cdot X + c \cdot X_1$$

Donde a, b y c son constantes de regresión

X, X1: EVI y VCFa

El modelo exponencial utilizado es del siguiente tipo:

$$B = a \cdot e^{(b \cdot X)}$$

Donde, a y b son constantes de regresión

X es la variable independiente (EVI ó VCFa)

RESULTADOS

La Tabla 4 lista los diferentes ajustes que se realizaron ante distintas combinaciones de las variables independientes. Se observa que el nivel de significancia del estadístico F es menor a 0.05 solo en las ecuaciones donde se incluye el término VCFa, lo cual implica que la variación explicada por el modelo no es aleatoria, sin embargo la inclusión de la variable SUM_EVI o MAX_EVI reduce enormemente el nivel de significación.

Adicionalmente a la regresión lineal se ha considerado un modelo de estimación exponencial por considerarse más apropiado cuando la relación entre la variable dependiente y las variables independientes no son necesariamente lineales. Nuevamente se relacionó la biomasa con las tres variables explicativas: SUM_EVI, MAX_EVI y VCFa. El valor de significancia del estadístico F es nuevamente menor a 0.05 y con alto valor de R cuadrado solo en el caso donde se utiliza la variable independiente VCFa, por otro lado la capacidad de explicación de los derivados del IV EVI son prácticamente nulos.

X	Y	Tipo de Vegetación	Biomasa media (ton/ha)	Referencia
71°18' W	4°34' N	Pasto	0.60	(Rippstein <i>et al.</i> , 2001)
71°16' W	4°28' N	Pasto	1.00	(Rippstein <i>et al.</i> , 2001)
75°4' W	6°46' N	Pasto	3.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
75°8' W	6°51' N	Pasto	3.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
71°19' W	4°28' N	Pasto	5.00	(Rippstein <i>et al.</i> , 2001)
75°8' W	6°48' N	Pasto	6.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
75°5' W	6°46' N	Pasto	8.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
67°25' W	8°59' N	Pasto	3.20	(San Jose y Montes, 1998)
72°33' W	2°24' N	Pasto	10.00	(Quiñones, 2002)
75°9' W	6°49' N	Bosque Secundario	11.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
74°21' W	6°17' N	Bosque Secundario	24.00	(Benitez y Serna, 2004)
75°6' W	6°45' N	Bosque Secundario	26.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
75°7' W	6°43' N	Bosque Secundario	30.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
75°9' W	6°48' N	Bosque Secundario	31.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
75°6' W	6°45' N	Bosque Secundario	32.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
75°8' W	6°47' N	Bosque Secundario	35.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
75°8' W	6°46' N	Bosque Secundario	50.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
74°18' W	6°25' N	Bosque Secundario	68.00	(Benitez y Serna, 2004)
75°4' W	6°46' N	Bosque Secundario	82.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
75°5' W	6°45' N	Bosque Secundario	86.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
75°32' W	6°3' N	Bosque Secundario	87.00	(CORNARE, 2002)
75°7' W	6°47' N	Bosque Primario	98.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
66°0' W	9°59' N	Bosque Primario	140.00	(Houghton <i>et al.</i> , 2001a)
75°6' W	6°44' N	Bosque Primario	154.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
77°17' W	4°33' N	Bosque Primario	194.00	(Lovelock <i>et al.</i> , 2005)
77°0' W	3°55' N	Bosque Primario	195.00	(Houghton <i>et al.</i> , 2001a)
75°34' W	6°2' N	Bosque Primario	217.00	(CORNARE, 2002)
67°4' W	1°58' N	Bosque Primario	218.00	(Saldarriaga <i>et al.</i> , 1998)
67°3' W	1°55' N	Bosque Primario	221.00	(Houghton <i>et al.</i> , 2001a)
75°8' W	6°50' N	Bosque Primario	239.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
73°55' W	6°49' N	Bosque Primario	252.00	(Houghton <i>et al.</i> , 2001a)
74°21' W	6°23' N	Bosque Primario	257.00	(Benitez y Serna, 2004)
67°2' W	1°58' N	Bosque Primario	264.00	(Saldarriaga <i>et al.</i> , 1998)
67°9' W	1°49' N	Bosque Primario	271.00	(Saldarriaga <i>et al.</i> , 1998)
70°0' W	9°30' N	Bosque Primario	296.0	(Houghton <i>et al.</i> , 2001a)
72°32' W	2°25' N	Bosque Primario	297.00	(Quiñones 2002)
75°6' W	6°45' N	Bosque Primario	298.00	(Orrego y Del Valle, 2001)
70°52' W	10°23' N	Bosque Primario	314.00	(Houghton <i>et al.</i> , 2001a)
73°32' W	6°24' N	Bosque Primario	325.81	(DAAC, 2002)
67°7' W	1°53' N	Bosque Primario	326.00	(Saldarriaga <i>et al.</i> , 1998)
72°10' W	0°39' S	Bosque Primario	343.00	(Houghton <i>et al.</i> , 2001a)
78°7' W	8°45' N	Bosque Primario	397.00	(DAAC, 2002)

Tabla 3. Valores de biomasa obtenidos a partir de datos de campo

Modelo	Ecuación	R ²	Sig. F
-7.80+0.003*SUM_EVI	1	0.07	0.151
112.9+0.011*MAX_EVI	2	0.00	0.659
-80.2+4.315*VCFa	3	0.82	0.000
-73.48+4.32*VCFa+0.001*MAX_EVI	4	0.82	0.000 ¹
-81.14+4.31*VCFa+0.00001*SUM_EVI	5	0.82	0.000 ²

¹MAX_EVI es no significativo

²SUM_EVI es no significativo

Tabla 4. Regresiones lineales y múltiples para estimación de biomasa (ton/ha)

Modelo	Ecuación	R ²	Sig. F
1.951*exp(0.063*VCFa)	6	0.783	0.000
1.197*exp(0.00006*SUM_EVI)	7	0.16	0.025
4.165*exp(0.00000*MAX_EVI)	8	0.06	0.185

Tabla 5. Regresiones exponenciales para estimación de biomasa

De esta forma se cuenta con un modelo lineal y un modelo exponencial como posibles estimadores de la biomasa utilizando como variable independiente VCFa. El modelo lineal predice una biomasa negativa cuando la proporción de arbolado es cercana a cero aumentando de forma constante hasta alcanzar un valor máximo de 352 ton/ha; por su parte el modelo exponencial fluctúa entre 2 y 1010 ton/ha. Se prefiere la ecuación exponencial puesto que ha resultado el mejor modelo en otras variables explicativas de la biomasa y se evitan valores negativos en los rangos bajos. Se propone como valor máximo estimado 397 ton/ha para evitar extrapolaciones.

Se observó sin embargo que existe una acumulación de píxeles con altos valores de porcentaje de arbolado pero con bajos valores de biomasa. Estos píxeles corresponden a Bosques Secundarios o píxeles ubicados en bosques altamente fragmentados. Con base en la discusión anterior se ajustó una ecuación exponencial para los valores de biomasa correspondientes a bosques intervenidos o secundarios. De igual forma el valor de significancia del estadístico F es menor a 0.05 con un coeficiente de determinación bastante alto ($r^2=0.72$). La Figura 2 muestra el incremento en biomasa y su incertidumbre al aumentar el porcentaje de arbolado para bosques naturales y bosques secundarios.

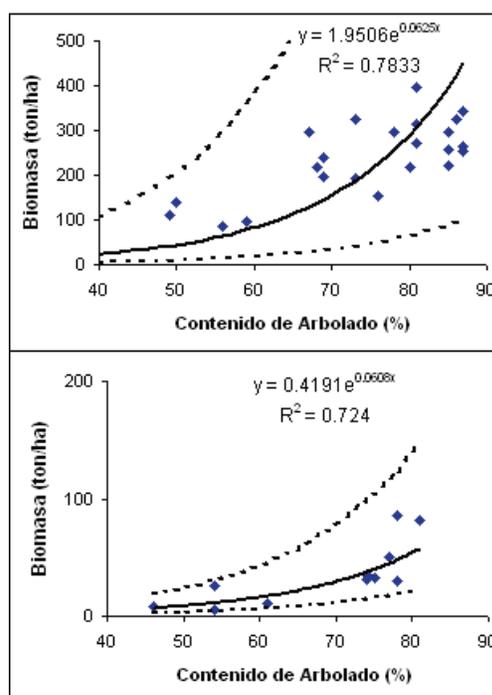


Figura 2. Modelos estimados: ecuación para bosques primarios (arriba) y ecuación para bosques secundarios (abajo) con Límites de Confianza al 90%

ANÁLISIS DE RESIDUALES

Se calcularon los residuales de los modelos exponenciales para calcular los rangos de mayor infra y supra estimación. Si bien no se observan tendencias consistentes (figura 3a), la los bosques Secundarios (figura 3b) muestran una tendencia a subestimar valores de biomasa en los rangos superiores, aunque serian necesarios más valores para confirmar esta tendencia.

Modelo	Ecuación	R ²	Sig. F
0.419*exp(0.061*VCFa)	9	0.724	0.001

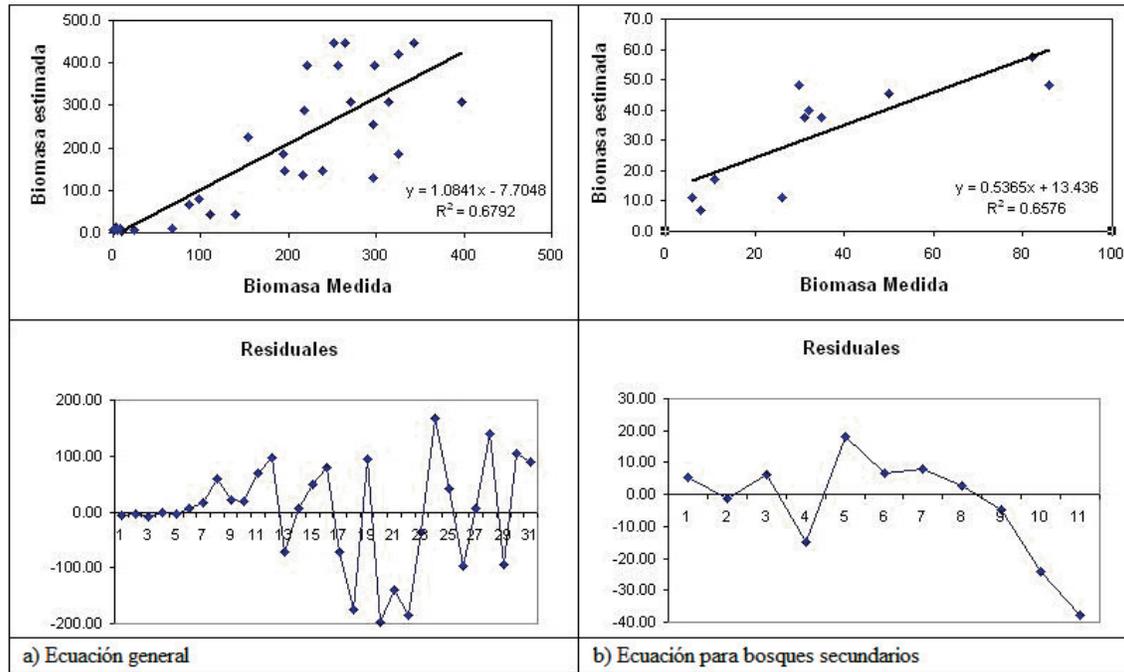


Figura 3. Ajuste entre datos medidos y estimados (arriba) y distribución del error, la biomasa incrementa de izquierda a derecha (abajo).

A pesar de las diferencias en EVI por tipo de cobertura vegetal (Figura 4), no se encontraron relaciones significativas entre los métricos de este índice (máximo, media, acumulado) y la biomasa medida en campo para los bosques. Una de las hipótesis para esta baja correlación son las diferencias fenológicas entre bosques templados donde ha sido aplicado con éxito y los bosques tropicales. En la Figura 4 se observa como los valores EVI de bosques húmedos en la zona de estudio varían entre 4500 y 5500 mientras que valores EVI en zonas templadas pueden variar entre 1000 y 5000 para un mismo año (Boles *et al.*, 2004). Por su parte el VCFa si demostró estar correlacionado con los valores de biomasa en las diferentes coberturas, confirmando la hipótesis sobre la cual los valores de biomasa aumentan de forma exponencial al aumentar el contenido de arbolado por píxel. La incertidumbre de este modelo aumenta al aumentar la biomasa por tanto se evitaron extrapolaciones y se definió la biomasa máxima medida en campo como el valor máximo posible en los cálculos, es decir 397 ton/ha.

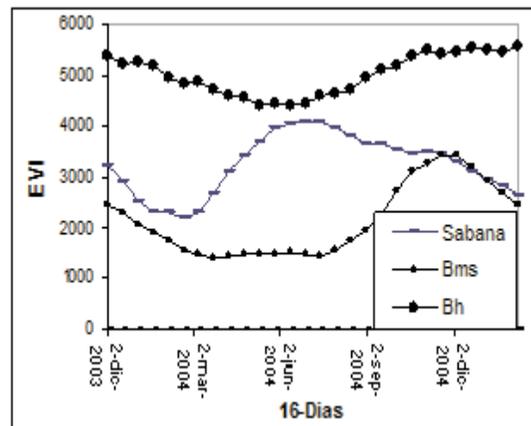


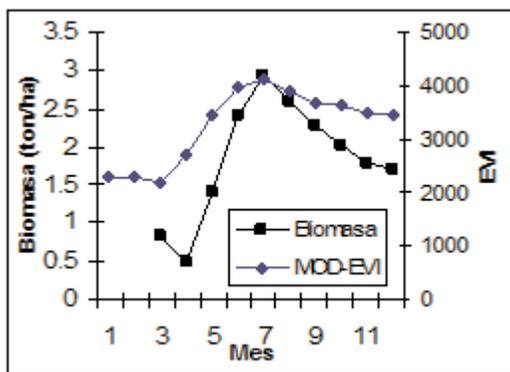
Figura 4. Comportamiento del Índice de Vegetación EVI-MOD13A1 por tipo de cobertura vegetal, Bosque Muy Seco (Bms), y Bosque Húmedo (Bh).

MODELO DE ESTIMACIÓN DE BIOMASA EN PASTIZALES (DINÁMICA)

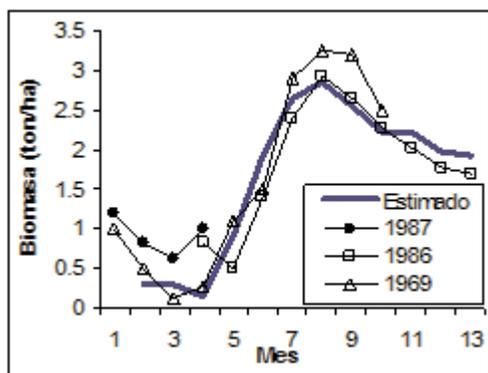
El modelo previamente analizado nos parecía consistente para la biomasa boscosa, pero para la herbácea resultaba excesivamente simple, ya que asume

un valor constante a lo largo del año, y en los pastos la variación estacional es bastante significativa. Para conocer mejor esa evolución anual, nos basamos en los datos de Scurlock *et al.*, (2003) que tomó valores mensuales de biomasa para la estación Calabozo de los Llanos en Venezuela, la cual a su vez fue elaborada por Jose y Montes (1998). Esa zona de estudio tiene características similares a los Llanos colombianos, por lo que puede considerarse representativa de ese sector en nuestra zona de estudio.

Para el seguimiento de los cambios mensuales de biomasa se utilizó EVI-MOD13A1, en la Figura 5 (a) los perfiles en cambios de biomasa y EVI fueron ajustados a la temporada seca con el fin de establecer una correlación entre EVI y el comportamiento mensual en biomasa para pastizales.



(a)



(b)

Figura 5. Productividad y valores del índice de vegetación EVI de la estación Calabozo en los Llanos Venezolanos (8.93 N, 67.42 W). En la figura (a) se hace explícita la relación entre MOD-EVI y la biomasa aérea medida en campo, en la figura (b) se observan los estimados de biomasa en función de MOD-EVI y las mediciones de campo en tres años distintos

En este sentido se ajustó una regresión lineal entre los valores MOD-EVI y la biomasa mensual medida en campo por Scurlock *et al.* (2003), en esta relación el valor mínimo de EVI corresponde al valor mínimo de biomasa y el valor aumenta proporcionalmente hasta alcanzar los valores máximos anuales. En la Figura 5 (b) se observa el ajuste de cambios mensuales en biomasa para distintos años con la ecuación estimada para biomasa a partir de EVI. La ecuación ajustada es:

$$B = 0.0014 * EVI - 2.8911 \quad R2: 0.90$$

Ecuación 10

Donde,

B: es biomasa de pastizales en Ton/ha

EVI: es el índice mejorado de vegetación escalado en 10000

Dado que el ajuste de la ecuación 10 se fundamenta en datos de campo exclusivamente para pastos se propone un factor de corrección cuando el píxel contiene arbolado.

$$B_p = (0.0014 * EVI - 2.8911) * (100 - VCFa) / 100 + FC * VCFa / 100$$

Ecuación 11

B_p: Biomasa en pastizales (ton/ha)

FC: factor de corrección para contenido de arbolado=31.4, media de bosque secundario.

SEPARACIÓN DE CLASES DE VEGETACIÓN

Con las ecuaciones ajustadas para pastizales, bosques secundarios y bosques primarios se procedió a clasificar a cada píxel dentro de una de estas tres clases. La separación de los tipos de vegetación desde el punto de vista estructural se realizó con el apoyo de mapas de vegetación (HACIENDA-IGAC, 1985) y la distribución de valores de VCFa. A partir del análisis de los de valores VCFa en regiones compuestas por pastizales, bosques primarios y bosques secundarios se determinó que aquellos píxeles con valores $0 < VCFa < 40$ pertenecen a pastizales, mientras que los píxeles con valores entre $41 < VCFa < 100$ pertenecen a bosques. Debido al traslape entre las distribuciones VCFa de las clases de bosque primario y secundario fue necesario diferenciarlas con el

apoyo del mapa de coberturas vegetales propuesto por HACIENDA-IGAC (1985).

Utilizando las ecuaciones 6, 9 y la estratificación de la vegetación por usos del suelo se calculó un valor de biomasa anual por píxel (500m) para bosques primarios y para bosques secundarios, por otro lado se calculó la biomasa mensual en pastos cada 16 días utilizando la ecuación 11 lo que permitió generar un mapa para cada una de las 28 fechas consideradas; con el fin de obtener un mapa anual de pastizales se calculó el promedio de las 28 fechas. De esta forma la biomasa fue caracterizada en su distribución por tipo de cobertura (Figura 6) y en su distribución es-

pacial (Figura 7). Los resultados de la distribución espacial de la biomasa en Colombia se presentan por regiones. Colombia ha sido clasificada en 5 regiones con características similares de relieve, clima, vegetación y suelo: Caribe, Pacífica, Andina, Orinoquía y Amazonía. Por tipo de cobertura se determinó que 576,968 km² se encuentran bajo Bosques Primarios alcanzando el 96% de la biomasa total, mientras que los pastizales y los bosques secundarios que ocupan un 35% del área de estudio contienen el 4% restante. En este análisis se excluyen las áreas desprovistas de vegetación.

	Área por tipo de cobertura (km ²) (1)	Biomasa aérea promedio (ton/ha)	Intervalos de confianza 90%	Biomasa (Millones de toneladas)
Bosque Primario	576,968	275	61 - 1246	15,866
Bosque Secundario	78,899	31.4	12 - 81	247
Pastizales	359,830	10	2 - 46	359

(1) Se excluyen los cuerpos de agua y suelo desnudo

Tabla 6. Estadísticos del modelo por tipo de cobertura

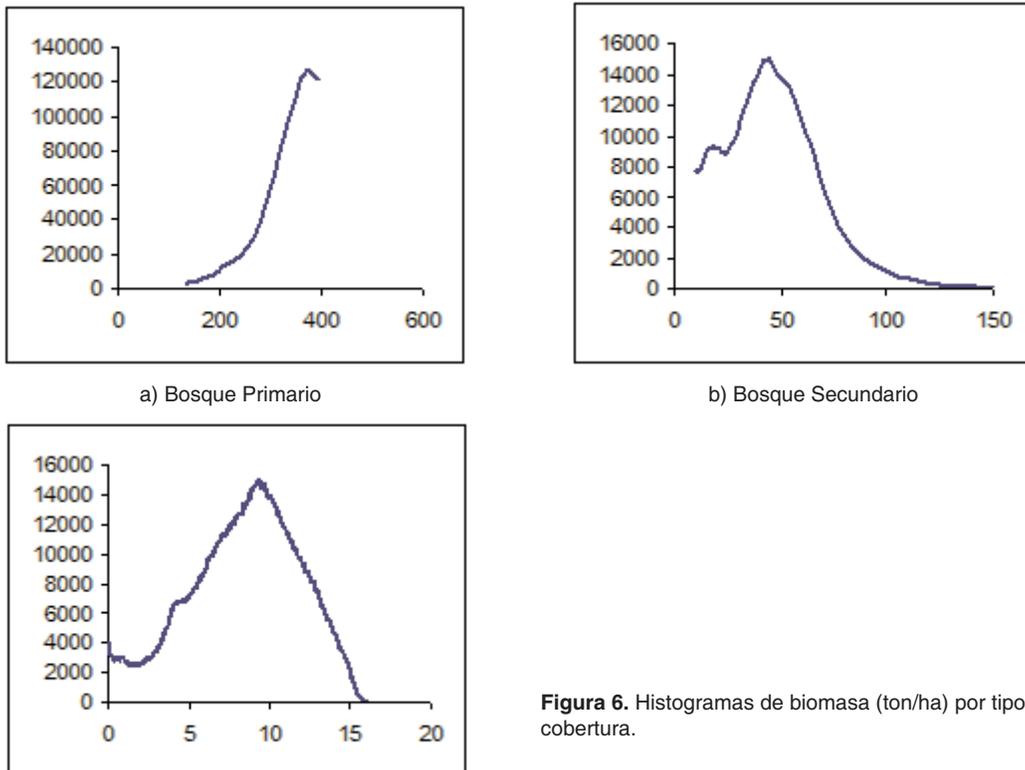


Figura 6. Histogramas de biomasa (ton/ha) por tipo de cobertura.

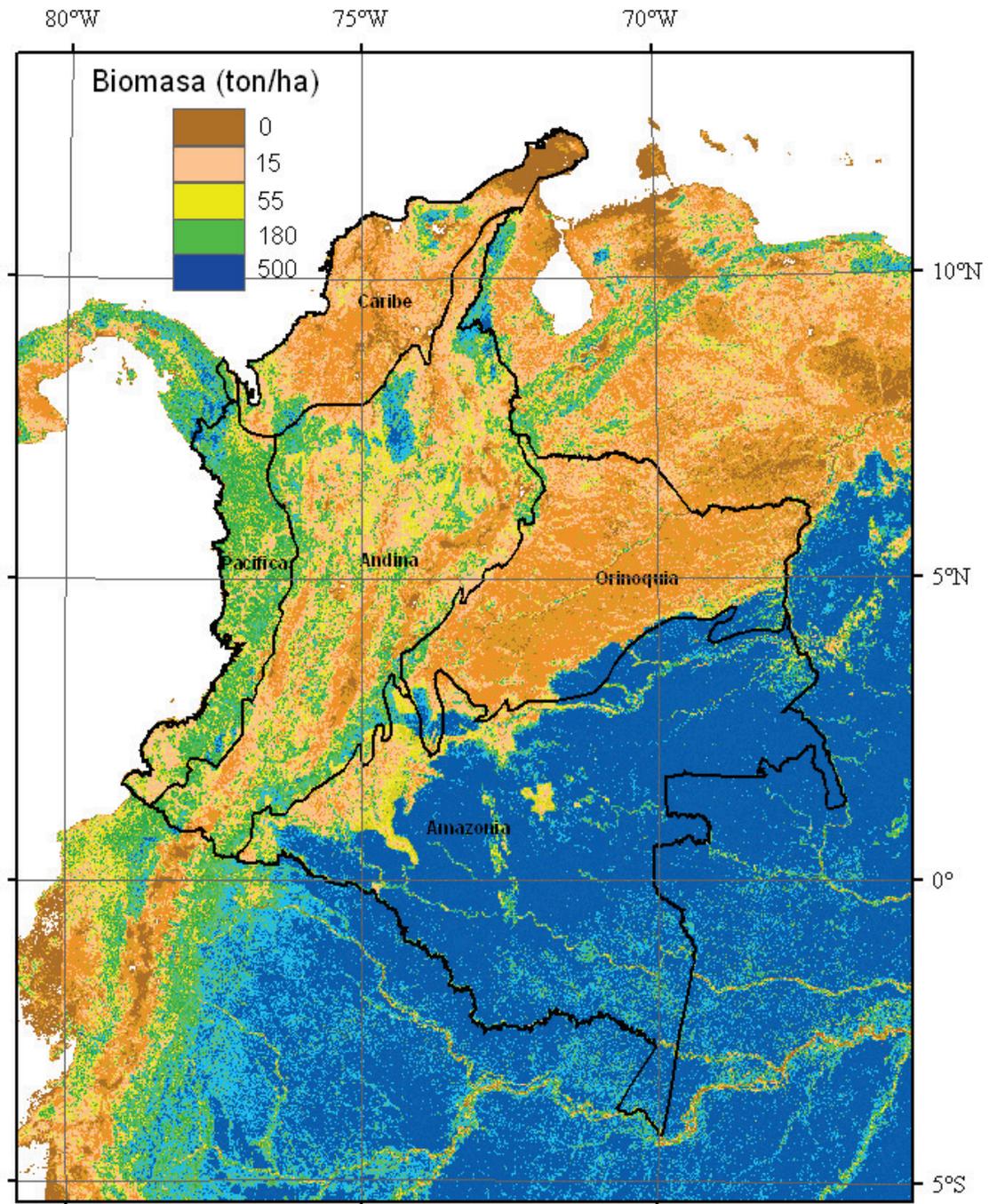


Figura 7. Distribución espacial de valores promedio de biomasa en Colombia.

La mayor parte de la biomasa se encuentra en la región de la amazonía (sur), seguida por las regiones pacífica (occidente) y andina (centro). Las menores concentraciones de biomasa se encuentran en la región de pastizales de la Orinoquía, principalmente *Trachypogon vestitas* y *Trachypogon plumosus* (oriente) y la región Caribe (norte), compuesta en su mayoría por pastizales y vegetación subxerofítica y en menor proporción por bosques, ciénagas y manglares.

Con el fin de analizar los cambios en biomasa de pastizales cada 16 días en las 28 fechas se seleccionaron cuatro áreas de 2500 km² a diferentes latitudes. Para cada zona y fecha se extrajo la distribución de la biomasa estimada. En la figura 8 se presentan las fechas más relevantes en cambios de tendencia, esto debido fundamentalmente a los períodos de lluvias: en Febrero después de la época de menores precipitaciones, en Abril al final de un fuerte período de crecimiento y en Septiembre, al final de la época lluviosa. En Colombia la precipitación esta regida por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual se mueve latitudinalmente siguiendo el movimiento aparente del sol.

En la Figura 8 se observa como cambia la distribución de los valores de biomasa intra-anual. La distribución de la vegetación 8(a) es exclusiva de pastizales con un contenido bajo de píxeles sin vegetación y por tanto la existencia de valores de biomasa igual a cero. Esto último es más evidente en el caso de la figura 8(b) donde adicionalmente no se observan cambios importantes en las distribuciones en los distintos meses, esto debido a la existencia de áreas inundadas que indican la disponibilidad de hu-

medad durante todo el año para la vegetación herbácea y la vegetación de tipo arbustivo circundante. Por otro lado las distribuciones hacia el norte presentan los valores medios más altos de biomasa debido a la presencia de cultivos transitorios intercalados con pastizales 8(c) y matorrales intercalados con pastizales 8(d). En general las distribuciones muestran un desplazamiento hacia valores mayores de biomasa desde el día juliano 49 hasta el día juliano 273, fecha a partir de la cual los valores empiezan nuevamente a disminuir completando su ciclo anual asociado a la ZCIT. Con lo cual se puede concluir que los valores más bajos de biomasa se concentran a finales de febrero, aumentando hasta alcanzar su máximo en Septiembre con una clara tendencia temporal.

DISCUSIÓN

El tratamiento de los bosques secundarios o intervenidos sigue siendo la mayor limitante en las estimaciones de biomasa, no solo por la dificultad en su separabilidad con técnicas de teledetección en el rango óptico con bosques primarios, si no también por su gran dinámica en extracciones por uso de la madera. Por otro lado la variación mensual de biomasa en los pastizales se encontró altamente correlacionada con el índice de vegetación EVI, debido fundamentalmente al aumento proporcional del verdor con la biomasa en virtud de los cambios en precipitación intra-anual. De esta forma los valores mas bajos de biomasa se encuentran en la época seca en Febrero y los valores más altos en la época de lluvias de Agosto.

Región	Área (km ²)	Biomasa aérea promedio (ton/ha)	Biomasa (Millones de toneladas)
Caribe	110,014	24	264
Andina	306,010	58	1,775
Pacífica	81,280	96	780
Orinoquia	202,618	43	871
Amazonia	439,090	291	12,777
Total del país	1,139,012		16,467

Tabla 7. Estadísticos de biomasa por región.

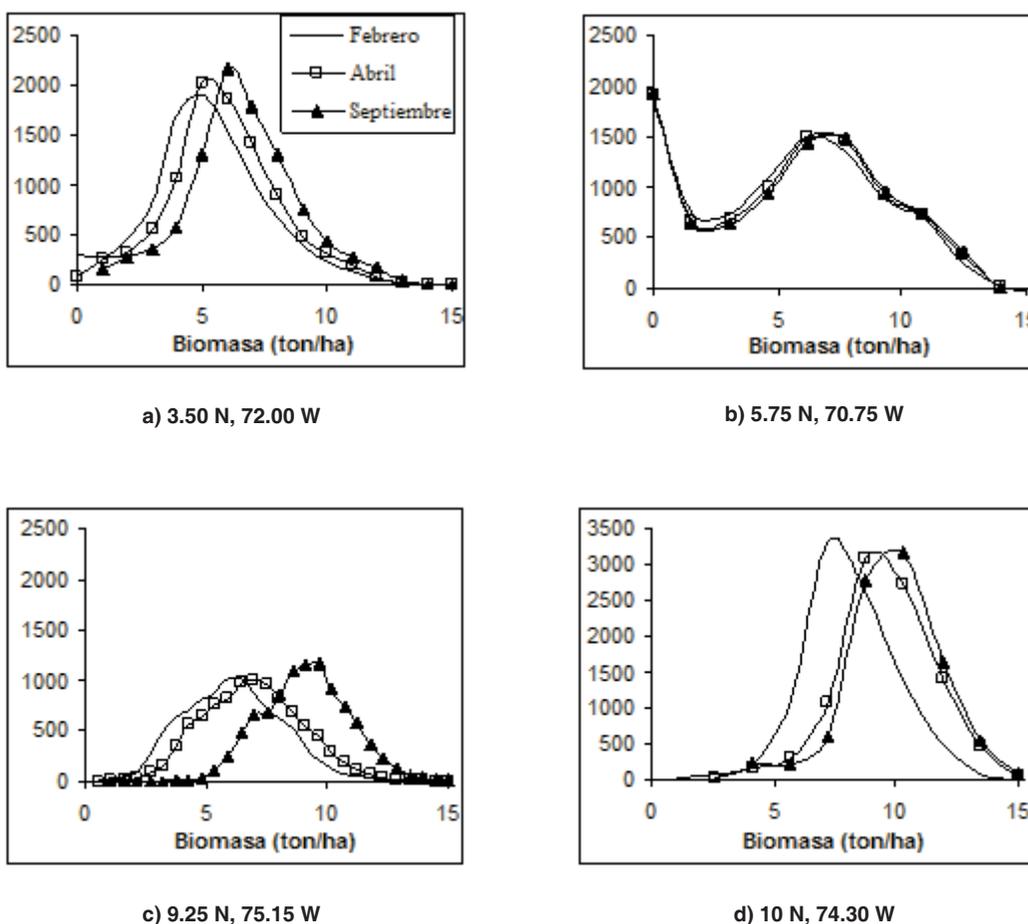


Figura 8. Modelación de la distribución intra-anual de los valores de biomasa por píxel para pastizales en distintas latitudes y épocas del año.

Con los métodos y materiales aquí propuestos se estima un total de 16,467 millones de toneladas de biomasa aérea en Colombia, con intervalos de confianza al 90% se estima que los límites inferior y superior están entre 3,473 y 23,693 millones de toneladas, donde el 96%, 15,866 millones de toneladas corresponden a Bosque Primario. Este resultado es acorde con FAO en su Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales, donde reporta para Colombia un total de de biomasa aérea en tierras boscosas de 15,398 millones de toneladas (FAO, 2005). Por otra parte, a partir de los valores revisados de densidad media de Carbono (Olson *et al.*, 2003) se calcula un total de 8,098 millones de toneladas para todo el país, lo cual equivale a un total de 16,195 millones de toneladas de biomasa, de las cuales el 97%, 15,664 millones de toneladas, corresponde a bosque primario. De esta forma se concluye

que el método propuesto se encuentra dentro de los rangos de estudios previos de estimación de biomasa en el ámbito regional aunque con un mayor detalle en su distribución espacial

En esta misma línea, se sugiere en trabajos futuros hacer aproximaciones a la variación de la biomasa basados en el seguimiento del procesos fotosintéticos. Para ello se pueden incluir los métodos propuestos por Monteith publicados en 1977 e implementados recientemente por MODIS en el producto MOD17A2 de productividad primaria, estos productos podrían ofrecer una aproximación cuantitativa a la variación intra-anual de biomasa. Resultados preliminares basados en MODIS-PsnNet para el área de estudio indican una alta productividad en bosques secundarios (11.3 ton/ha), seguido por los bosques primarios (8.1 ton/ha) y pastizales (6.7 ton/ha).

REFERENCIAS

- BARUCH, Z. 2005. Vegetation-environment relationships and classification of the seasonal savannas in Venezuela. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 200:49-64.
- BENITEZ, P.A., y SERNA, J.C. 2004. Deforestación y flujos de carbono en los bosques asociados con ciénagas del Magdalena Medio, Colombia., Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- BOLES, S.H., XIAO, X., LIU, J., ZHANG, Q., MUNKHTUYA, S., CHEN, S., y OJIMA, D. 2004. Land cover characterization of Temperate East Asia using multi-temporal VEGETATION sensor data. *Remote Sensing of Environment* 90:477-489.
- BROWN, S. 1997. Estimating biomass and biomass change in tropical forests: a primer. FAO Forestry Paper 134, Rome.
- CIHLAR, J. 2007. Quantification of the regional carbon cycle of the biosphere: Policy, science and land-use decisions. *Journal of Environmental Management* 85:785-90.
- CLARK, D.B., y CLARK, D.A. 2000. Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest. *Forest Ecology and Management* 137:185-198.
- CORNARE. 2002. Modelo de financiación alternativo para el manejo sostenible de los bosques de San Nicolás. Universidad Nacional de Colombia - Cornare, Medellín.
2004. LDOPE Tools User's. Release 1.4.
- DAAC, O. 2002. NPP Data. Global Change Master Directory.
- DEFRIES, R.S., HANSEN, M.C., TOWNSHEND, J.R., JANETOS, A.C., y LOVELAND, T.R. 2000. A new global 1-km dataset of percentage tree cover derived from remote sensing. *Global Change Biology* 6:247-254. (ed.) 2002. National Acad Sciences.
- DONG, J., KAUFMANN, R.K., MYNENI, R.B., TUCKER, C.J., KAUPPI, P.E., LISKI, J., BUERMANN, W., ALEXEYEV, V., y HUGHES, M.K. 2003. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. *Remote Sensing of Environment* 84:393-410.
- DRAKE, J.B., DUBAYAH, R.O., KNOX, R.G., CLARK, D.B., y BLAIR, J.B. 2002. Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. *Remote Sensing of Environment* 81:378-392.
- FAO. 2005. Global forest resources assessment (FRA) 2005 - main report. Progress towards sustainable forest management. FAO Forestry paper 147:318.
- HACIENDA-IGAC, M.D. 1985. Mapa de Bosques. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá.
- HALL, S.A., BURKE, I.C., BOX, D.O., KAUFMANN, M.R., y STOKER, J.M. 2005. Estimating stand structure using discrete-return lidar: an example from low density, fire prone ponderosa pine forests. *Forest Ecology and Management* 208:189-209.
- HANSEN, M.C., DEFRIES, R.S., TOWNSHEND, J.R.G., MARUFU, L., y SOHLBERG, R. 2002. Development of a MODIS tree cover validation data set for Western Province, Zambia. *Remote Sensing of Environment* 83:320-335.
- HANSEN, M.C., DEFRIES, R.S., TOWNSHEND, J.R., CARROLL, M., DIMICELI, C., y SOHLBERG, R. 2003. MOD44B: Vegetation Continuous Fields Collection 3, Version 3.0.0. *Earth Interactions*:1-20.
- HEROLD, M., ACHARD, F., DE FRIES, R.S., SKOLE, D., BROWN, S., y TOWNSHEND, J.R. 2006. Report of the Workshop on Monitoring Tropical Deforestation for Compensated Reductions. Friedrich-Schiller University Jena.
- HOUGHTON, R.A., LAWRENCE, K.T., HACKLER, J.L., y BROWN, S. 2001a. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Global Change Biology* 7:731-746.
- HOUGHTON, R.A., LAWRENCE, K.T., HACKLER, J.L., y BROWN, S. 2001b. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Global Change Biology* 7:731-746.
- HUETE, A., LIU, H., y LEEUWEN, W. 1997. The Use of Vegetation Indices in Forested Regions: Issues of Linearity and Saturation. *IEEE*:1966-1968.
- HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E.P., GAO, X., y FERREIRA, L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83:195-213.

- JIMENEZ, J., MORENO, A.G., LAVELLE, P., y DECAENS, T. 1998. Population dynamics and adaptive strategies of *Martiodrilus carimaguensis* (Oligochaeta, Glossoscolecidae), a native species from the well-drained savannas of Colombia. *Applied Soil Ecology* 9:153-160.
- KEELING, H.C., y PHILLIPS, O.L. 2007. The global relationship between forest productivity and biomass. *Global Ecology and Biogeography* 0:1-14.
- LOVELOCK, C.E., FELLER, I.C., MCKEE, K.L., y THOMPSON, R. 2005. Variation in Mangrove Forest Structure and Sediment Characteristics in Bocas del Toro, Panama. *Caribbean Journal of Science* 41:456-464.
- MAYAUX, P., BARTHOLOMÉ, E., MASSART, M., VAN CUTSEM, C., CABRAL, A., NONGUIERMA, A., DIALLO, O., PRETORIUS, C., THOMPSON, M., CHERLET, M., PEKEL, J.-F., DEFOURNY, P., VASCONCELOS, M., DI GREGORIO, A., FRITZ, S., DE GRANDI, G., ELVIDGE, C., VOGT, P., y BELWARD, A. 2003. A land cover map of Africa. European Commission, Joint Research Centre.
- MEANS, J.E., ACKER, S.A., HARDING, D.J., BLAIR, J.B., LEFSKY, M.A., COHEN, W.B., HARMON, M.E., y MCKEE, W.A. 1999. Use of Large-Footprint Scanning Airborne Lidar To Estimate Forest Stand Characteristics in the Western Cascades of Oregon. *Remote Sensing of Environment* 67:298-308.
- MENAUT, J.C., ABBADIE, L., LAVENU, F., LOUDJANI, P., y PODAIRE, A. 1991. Biomass burning in West African savannas. *Global biomass burning - Atmospheric, climatic, and biospheric implications*:133-142.
- MOUTINHO, P., y SCHWARTZMAN, S., (eds.) 2005. Tropical deforestation and climate change. Amazon Institute for Environmental Reserach, Belem.
- PNAS (ed.) 2001. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.
- NASCIMENTO, H.E., y LAURANCE, W.F. 2002. Total aboveground biomass in central Amazonian rainforests: a landscape-scale study. *Forest Ecology and Management* 168:311-321.
- OLSON, J.S., WATTS, J.A., y ALLISON, L.J. 1985. Major World Ecosystems Complexes Ranked by Carbon in Live Vegetation: A Database, pp. 18, In U. S. D. o. Energy, (ed.). R.E. Millemann, T.A Boden, Carbon Dioxide Information Center, Information Resources Organization, Oak Ridge National Lab.
- OLSON, J.S., WATTS, J.A., y ALLISON, L.J. 2003. LBA Regional Carbon in Live Vegetation, 0.5-Degree (Olson) [<http://www.daac.ornl.gov>] Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.
- S. A. Orrego y J. I. Del Valle (ed.) 2001. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile.
- PRIVETTE, J.L., MYNENI, R.B., KNYAZIKHIN, Y., MUKELABAI, M., ROBERTS, G., TIAN, Y., WANG, Y., y LEBLANC, S.G. 2002. Early spatial and temporal validation of MODIS LAI product in the Southern Africa Kalahari. *Remote Sensing of Environment* 83:232-243.
- QUIÑONES, M. 2002. Polarimetric Data for Tropical Forest Monitoring. Studies at the Colombian Amazon, Wageningen University, Wageningen.
- RIPPSTEIN, G., ESCOBAR, G., y MOTTA, F., (eds.) 2001. Agroecología y Biodiversidad de las Sabanas en los Llanos Orientales de Colombia, Vol. 1, pp. 1-302. CIAT; no. 322.
- SALDARRIAGA, J.C., DARRELL, C.W., THARP, M.L., y UHL, C. 1998. Long-Term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela. *Journal of Ecology* 76:938-958.
- SAN JOSE, J., y MONTES, R.A. 1998. NPP Grassland: Calabozo, Venezuela, 1969-1987. Data set. [<http://www.daac.ornl.gov>] Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.
- SAN JOSE, J.J., y MONTES, R.A. 2007. Resource apportionment and net primary production across the Orinoco savanna-woodland continuum, Venezuela. *Acta Oecológica* In Press, Corrected Proof.
- SCANLON, T.M., CAYLOR, K.K., MANFREDA, S., LEVIN, S.A., y RODRIGUES, I. 2005. Dynamic response of grass cover to rainfall variability: implications for the function and persistence of savanna ecosystems. *Advances in Water Resources* 28:291-302.

- SCHELLER, R.M., y MLADENOFF, D.J. 2004. A forest growth and biomass module for a landscape simulation model, LANDIS: design, validation, and application. *Ecological Modelling* 180:211-229.
- SCHWARZ, M., ZIMMERMANN, E., y WASER, L.T. 2004. MODIS based continuous fields of tree cover using generalized linear models. *IEEE*:2377-2380.
- SIERRA, C.A., DEL VALLE, J.I., ORREGO, S.A., MORENO, F.H., HARMON, M.E., ZAPATA, M., COLORADO, G.J., HERRERA, M.A., LARA, W., RESTREPO, D.E., BERRUET, L.M., LOAIZA, L.M., y BENJUMEA, J.F. 2007. Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia. *Forest Ecology and Management* 243:299-309.
- STEININGER, M.K. 2000. Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing* 21:1139-1157.
- UNZALAN, C., y BOYER, K. 2003. Linearized Vegetation Indices Using a Formal Statistical Framework. *IEEE*:982-984.
- WESSELS, K.J., PRINCE, S.D., ZAMBATIS, N., MACFADYEN, S., FROST, P.E., y VAN ZYL, D. 2006. Relationship between herbaceous biomass and 1-km² Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) NDVI in Kruger National Park, South Africa. *International Journal of Remote Sensing* 27:951-973.
- ZHANG, B., SONG, K., ZHANG, Y., LI, F., y WANG, Z. 2005. Study on the Relationship between Hyperspectral Reflectance and Soybean LAI, aboveground Biomass. *IEEE*:3583-3586.