

Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia

Dauber, E.; Terán, J.¹ y Guzmán, R.

Resumen

Se estimaron valores de biomasa aérea total de todos los árboles a partir de 10 cm de DAP en bosques naturales de cuatro ecoregiones bolivianas: Amazonía, Preandino amazónico, Transición chiquitano amazónica y Chiquitanía. Se utilizaron datos de 600 mil árboles obtenidos en 74 inventarios forestales y la ecuación más exigente desarrollada por Brown et al. (1989), que requiere el DAP, altura total y densidad básica como variables independientes.

Los valores de biomasa aérea total varían entre promedios de 97 t/ha en la ecoregión de Transición chiquitano-amazónica hasta 171 t/ha en la Amazonía. En consecuencia la variación del carbono almacenado es de 49 t/ha a 86 t/ha respectivamente. Habiendo realizado ajustes de curvas de altura con datos locales, se alerta la ocurrencia de sobre estimaciones de biomasa al utilizar funciones de altura derivadas en otras zonas tropicales. Otros resultados logrados son los factores de expansión de volumen y de biomasa, lo que permitirá el uso más amplio de datos de inventarios convencionales.

1. Introducción

Dadas las múltiples evidencias de los efectos negativos que causan en los climas locales y mundiales la acumulación de gases de efectos invernadero (GEI) en la atmósfera, el control de emisiones y flujos de carbono, constituyen temas principales de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC).

Como fuentes principales de emisión de CO₂ se menciona la combustión de combustibles fósiles y la producción de cemento en los países industrializados, así como la

deforestación y cambio de uso de la tierra en los países tropicales (Brown y Lugo 1992).

De esta manera los bosques juegan un rol principal no solo como factor de desarrollo de un país y de sus modelos de sostenibilidad, sino que adquieren protagonismo mundial por su probable reconocimiento como sumideros en los sistemas contables de los ciclos de carbono.

Sin embargo aparte de las incertidumbres sobre las tasas de cambio de la cobertura y masa forestal, es particularmente crítica la falta de información cuantitativa de biomasa y carbono almacenado en estos ecosistemas y particularmente en las poblaciones de árboles.

Es necesario mejorar esta situación avanzando en la estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea forestal existente con la mayor exactitud posible, a efectos de modelar los flujos de carbono por cambio del uso de la tierra cuyos resultados dependerán en gran parte de las cuantificaciones de biomasa de los bosques.

En este sentido el presente estudio fijó como objetivos, contribuir al tema generado la información siguiente:

Estimaciones de biomasa aérea del estrato arbóreo en bosques naturales de cuatro ecoregiones de Bolivia.

Estimaciones del carbono almacenado en la biomasa aérea del estrato arbóreo en bosques naturales de cuatro ecoregiones de Bolivia.

2. Metodología

2.1 Definiciones de biomasa

A efectos de este estudio se consideran las siguientes definiciones:

Biomasa aérea total (Bt), se refiere al peso seco del material vegetal de los árboles con DAP mayor a 10 cm, incluyendo fustes, corteza, ramas y hojas. Corresponde a la altura total del árbol, desde el suelo hasta el ápice de la copa.

Biomasa de fustes (Bf), se refiere al peso seco de los fustes con DAP mayor a 10 cm. Corresponde a la altura comercial del árbol desde el suelo hasta la primera bifurcación o inicio de la copa.

2.2 Conceptos básicos y ecuación de biomasa utilizada

Según Brown et al. (1989) las estimaciones de biomasa a nivel regional, nacional o mundial no deberían basarse en pocas parcelas de medición directa porque las muestras a esta escala no son representativas. En estas situaciones proponen utilizar la información de inventarios forestales los que logran suficiente cobertura de superficie para representar la población de interés. A partir de datos de inventarios forestales, se tienen dos diferentes métodos de cálculo de estimación de biomasa: el primero basado en ecuaciones matemáticas y el segundo en factores de expansión.

El método que utiliza factores de expansión, se aplica cuando no existe la información detallada de un inventario forestal con los parámetros de cada árbol individual. Consiste en multiplicar la biomasa de los fuste, por el factor de expansión de biomasa dando como resultado el valor de biomasa aérea total. La biomasa de los fustes es el producto del volumen de los fuste (volumen comercial) por la

densidad básica promedio de las especies.

En nuestro caso se pudo aplicar el primer método al contar con todos los datos necesarios (DAP, altura total y densidad básica de la madera) para aplicar la ecuación de estimación de biomasa más exacta descrita por Brown et al. (1989) de tipo exponencial y derivada para el bosque húmedoⁱⁱ:

$$B_t e^{(-2.4090 + 0.9522 \ln(d^2 h \delta))}$$

[1]

donde:

B_t= biomasa aérea total (kg)

e = base del logaritmo natural (2.718271)

d = diámetro a la altura del pecho o DAP (cm)

h=altura total del árbol (m)

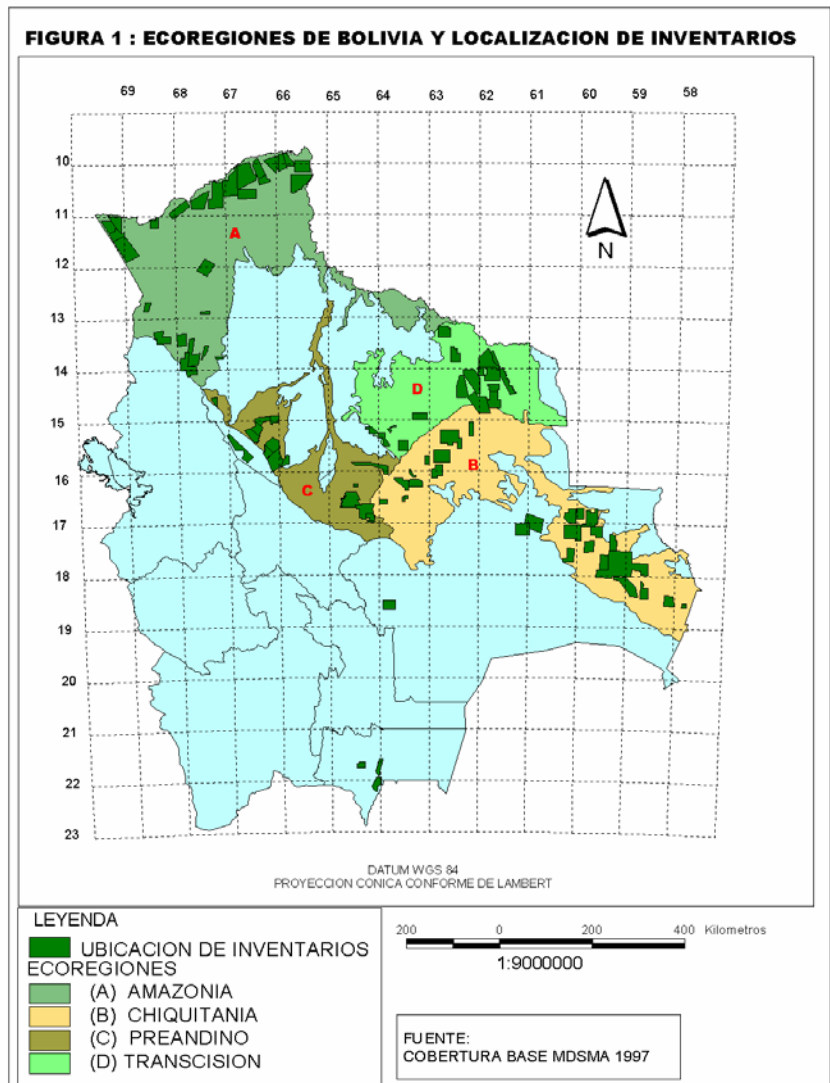
δ = densidad básica de la madera (g/cm³ o t/m³)

Es importante anotar que la ecuación de regresión fue modelada con las unidades anotadas (kg, cm, m y t/m³) y por lo tanto éstas son las unidades de entrada para las variables de la ecuación. Si tenemos el DAP en metros se deberán convertir a centímetros. Igualmente, si deseamos el valor de biomasa en toneladas (t), convertiremos kilogramos (kg) a toneladas.

2.3 Fuente de datos

2.3.1 Inventarios forestales

Se han utilizado los datos de DAP, altura de fuste y altura total de más de 600 mil árboles registrados en 74 inventarios forestales (Figura 1; Cuadro 1). Esta base de datos ya fue anteriormente utilizada para aproximar las existencias maderables de los bosques naturales de Boliviaⁱⁱⁱ.



Cuadro 1. Ecoregiones y número de inventarios

Región	No de inventarios
Amazonía	21
Preandino amazónico	14
Transición chiquitano amazónica	11
Chiquitanía	28
Total	74

Los inventarios forestales utilizados abarcan gran parte de los bosques naturales de Bolivia, cubriendo específicamente cuatro ecoregiones: Amazonía, Preandino amazónico,

Transición chiquitano amazónica (Precámbrico) y Chiquitanía (MDSMA 1997).

En los inventarios forestales generalmente no se mide el DAP de los fustales (10 cm ≤ DAP < 20 cm), siendo común solo contabilizarlos por especie. En estos casos se ha fijado un DAP promedio de 15 cm. En tanto que para las alturas totales faltantes estas fueron calculadas con funciones y factores de corrección locales, como veremos a continuación.

2.3.2 Funciones de altura locales

Aunque todos los inventarios incluyen mediciones de DAP y estimaciones de la altura de fuste (comercial) de los árboles con DAP mayor o igual a 20 cm, solamente 40% de los inventarios utilizados disponían de datos de estimaciones de altura total (h).

En el caso de los inventarios sin valores de altura total (60%), se determinó conveniente estimarla en base a una función que relaciona la altura total con el DAP (Brown et al. 1989).

Para obtener una regresión que represente la relación entre DAP y la altura total o en su caso la relación DAP y altura del fuste, se ha ensayado los siguientes tipos de funciones:

$$h = a_0 + a_1 d + a_2 d^2 \quad [2]$$

$$\ln h = a_0 + a_1 \ln d \quad [3]$$

$$\ln h = a_0 + a_1 \ln d + a_2 \ln^2 d \quad [4]$$

$$\ln h = a_0 + a_1 d + a_2 \ln d \quad [5]$$

donde:

h = altura total (ht) o altura del fuste (hf) en m

ln = logaritmo natural

d = diámetro a la altura del pecho (DAP) en cm

La función de regresión logarítmica con componente parabólico [4], fue seleccionada para estimar la altura total y comercial en función del DAP.

Para el cálculo de las ecuaciones se utilizaron 1241 mediciones de DAP y altura realizadas en árboles de varios lugares de tres diferentes ecoregiones (Cuadro 2).

A pesar del cuidado especial que se ha llevado en el campo para incluir la mayor cantidad posible de árboles grandes, no se encontró más de seis individuos encima de 200 cm de DAP. En este sentido usar la función en el rango de extrapolación no es estadísticamente correcto. Sin

embargo los inventarios muestran la existencia de individuos con diámetros muy grandes que aunque pocos, influyen notablemente en las estimaciones de biomasa.

Por lo tanto para elegir el mejor ajuste (ecuación 4), aparte de los criterios convencionales (índice de ajuste, error estándar, análisis de residuos), nos hemos guiado fundamentalmente por el comportamiento de las curvas en el

corrección de altura total y de fuste para cada ecoregión. Los factores de corrección se obtuvieron al dividir la altura total de cada árbol estimada en los inventarios y la altura estimada mediante la función mencionada [4].

2.3.3 Densidades básicas promedio

La densidad básica está definida como el cociente del peso seco al horno y el

Cuadro 2. Lugares y número de árboles medidos (con clinómetro) para derivar funciones de altura

Lugar	Derecho	Ecoregión	Nº de árboles
San Miguel	CO	Chiquitanía	52
Cimal	CO	Chiquitanía	66
Todos Santos	PP	Chiquitanía	195
Vasber	CO	Chiquitanía	225
Lago Rey	CO	Transición chiquitano amazónica	105
Cerro Pelao	PP	Transición chiquitano amazónica	72
Taruma	CO	Transición chiquitano amazónica	94
Urubichá	PP	Transición chiquitano amazónica	120
Don Enrique	CO	Preandino amazónico	263
BEEM	CO	Preandino amazónico	49
Total			1241

CO = Concesión Forestal; PP = Propiedad Privada

rango de extrapolación, o sea para diámetros mayores de 200 cm. De esta manera el principal criterio para la elección del tipo de función de altura más adecuada, fue que en el rango de extrapolación rinda estimaciones realistas.

No se consideró necesario derivar funciones de altura por ecoregión porque los valores entre regiones no varían notablemente. Esta relativa homogeneidad se debe probablemente a la selección dirigida o preferencial de los árboles medidos.

Comparando las curvas de alturas medidas con las alturas estimadas en los inventarios forestales, se observó que las alturas medidas (Cuadro 2) son más altas que aquellas estimadas en los inventarios y no representan al promedio de cada ecoregión.

Se ha considerado necesario ajustar esta diferencia, derivando factores de

volumen verde, expresadas en toneladas sobre metros cúbicos (t/m^3) o en gramos sobre centímetros cúbicos (gr/cm^3).

No todas las especies inventariadas tienen reportados valores de densidad o peso específico de la madera. El uso de literatura especializada, permitió asignar valores de densidad a las especies más importantes y más abundantes (MAGDR 1.998; INIA-OIMT 1.996; Davidson M. A. 1.984).

Al no disponer de valores de densidad para una parte de las especies se utilizó una media ponderada por ecoregión (Brown y Lugo 1.992; Brown 1.997). Esta media ponderada se obtiene con las densidades de especies conocidas y el volumen por ha de estas especies como factor de ponderación. Esta media ponderada fue aplicada solamente a especies con densidad básica desconocida.

2.4 Parámetros calculados y/o estimados

Se calcularon los siguientes parámetros para las poblaciones de árboles a partir de 10 cm de DAP:

a) Rangos y promedios por inventario y ecoregión de:

a.1 Diámetro cuadrático promedio (dg; cm)

a.2 Abundancia (N; arb/ha),

a.3 Área Basal (G; m²/ha) y

a.4 Volumen de fuste (V; m³/ha)

b) Rangos y promedios por inventario y ecoregión de:

b.1 Biomasa de fuste (Bf; t/ha),

b.2 Biomasa aérea total (Bt; t/ha) y

b.3 Carbono almacenado en la biomasa aérea total (CBt; t/ha)

El CBt resulta de multiplicar la biomasa aérea total por el factor de 0.5 (Brown y Lugo 1992):

$$CBt = Bt \cdot 0,5 \quad [6]$$

donde:

CBt = Carbono almacenado

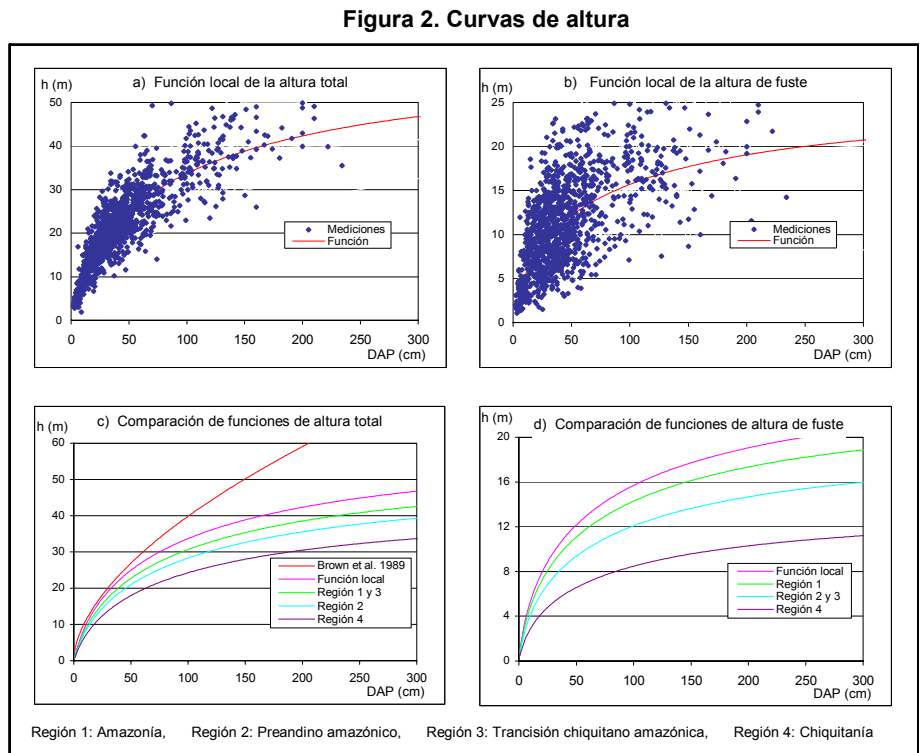
Bt = Biomasa área total

c) Rangos y promedios por ecoregión de:

c.1 Factor de expansión de volumen, que es el cociente del volumen de los fustes a partir de 10 cm DAP (incluyendo los fustales) y el volumen a partir de 20 cm DAP:

$$Fev = \frac{V_{DAP \geq 10cm}}{V_{DAP \geq 20cm}} \quad [7]$$

Este factor puede ser utilizado en estudios futuros cuando solamente se conoce el volumen comercial de los fustes a partir de 20 cm, que normalmente es el diámetro límite de



levantamiento en los inventarios forestales en Bolivia.

Para estimar el volumen de fustes correspondiente a un diámetro mínimo de 10 cm, que es el estándar internacional para la estimación de biomasa: se multiplica el volumen dado a partir de 20 cm con el correspondiente factor de expansión de volumen.

c.2 Factor de expansión de biomasa, definido como cociente de la biomasa aérea total y la biomasa de los fustes:

$$Feb = \frac{Bt}{Bf} \quad [8]$$

Mediante este factor se puede calcular la biomasa aérea total a partir de la biomasa de los fustes, la cual se obtiene multiplicando el volumen de los fustes (a partir de 10 cm DAP) con la densidad básica promedio de las especies.

3. Resultados

3.1. Funciones locales de altura

Aplicando las 1.241 mediciones de altura a la ecuación [4], se logra una función bastante flexible que rinde valores razonables para extrapolación de diámetros mayores (Figura 2a y 2b).

La función de altura utilizada por Brown et al. (1989), basada en datos de Venezuela, Puerto Rico y Papua Nueva Guinea, es una ecuación de tipo [3], una recta en el sistema doble logarítmico y tiende a sobre estimar la altura en el rango de diámetros mayores, o sea en el rango de extrapolación (Figura 2c).

En general las curvas locales están por debajo de las curvas que resultan de la función utilizada por los autores arriba citados. Esto muestra que pueden ocurrir sesgos de estimación que muchas veces pueden pasar desapercibidos, al utilizar ecuaciones de altura derivadas en otros países tropicales con diferentes condiciones biofísicas.

La variabilidad entre ecoregiones muestra también un aparente gradiente climático nor-oeste a sur-este, desapercibido al utilizar ecuaciones de altura derivadas en otros países tropicales con diferentes condiciones biofísicas.

Como se puede observar en la Figura 2 (2c y 2d), las alturas disminuyen desde la Amazonía, una región bastante húmeda con bosques altos hasta llegar a la Chiquitanía (próxima al Chaco), una región comparativamente seca con bosques de un promedio de altura relativamente bajo.

Las diferencias regionales en la altura promedio de los árboles se reflejan en los factores de corrección cuya aplicación permite una mejor adaptación al nivel de altura existente en cada ecoregión (Cuadro 3).

Cuadro 3. Funciones locales de altura y factores de corrección regionales

Función local de altura total	Función local de altura de fuste (comercial)	
$ht = \exp(0,1577 + 1,0776 \ln d - 0,0756 \ln^2 d)$	$hf = \exp(-0,1071 + 0,9181 \ln d - 0,0645 \ln^2 d)$	
donde:	donde:	
ht = altura total (m); d = DAP(cm)	hf = altura del fuste (m); d = DAP(cm)	
Factores de corrección (curvas regionales)		
	Altura total	Altura del fuste
Amazonía	0.91	0.91
Preandino amazónico	0.84	0.75
Transición chiquitano-amazónica	0.91	0.77
Chiquitanía	0.72	0.54

Los factores de corrección varían notablemente entre regiones y son por lo general más pronunciados para las alturas de fuste. Llama la atención el bajo valor en la Chiquitanía, ello ocurre probablemente debido a una notable heterogeneidad (arquitectural) de los fustes de los árboles inventariados.

La ecuación de altura de fuste y sus correspondientes factores de corrección, solo fueron usados para completar datos en los inventarios cuando no se reportaron las alturas de fuste (por ejemplo en la categoría de fustales o excepcionalmente en la categoría de los árboles, que en menos de 1% de los casos mostraron esta deficiencia).

Es importante señalar que el uso de la altura comercial en este estudio ha sido limitada a cálculos de volúmenes comerciales, biomasa de fustes y factores de expansión.

3.2 Densidad básica promedio por ecoregión

Se encontró que entre el 63 a 79 % del volumen total maderable, según la ecoregión considerada, corresponde a especies con densidad básica conocida. De allí que solo parte minoritaria de la biomasa del bosque ha sido estimada aplicando las densidades básicas promedio por ecoregión siguientes:

Cuadro 4. Densidad básica promedio por ecoregión (aplicada solo a especies con densidad desconocida)

Región	Densidad básica promedio (t/m ³)
Amazonía	0,606
Preandino amazónico	0,512
Transición chiquitano amazónica	0,546
Chiquitanía	0,694

3.3 Parámetros dasométricos

Los valores presentados se refieren a un diámetro mínimo de medición de 10 cm, el estándar internacional. La inclusión de los fustales (10 cm ≤ DAP < 20 cm) resulta en diámetros cuadráticos medios relativamente bajos de 25 a 26 cm y eleva la abundancia por ha a valores altos, que en algunos casos llegan a más de 600 árboles por ha (Cuadro 5).

Como se esperaba, los parámetros forestales abundancia, área basal y volumen por ha alcanzan valores máximos en la Amazonía, seguido por el Preandino amazónico, la Chiquitanía y la Transición chiquitano amazónica, con la única excepción del volumen donde se invierte la secuencia de las últimas dos regiones. En este caso, la Chiquitanía^{iv} está en último lugar lo que se puede explicar con las alturas comerciales relativamente bajas que corresponden a esta región.

Cuadro 5. Valores de los parámetros dasométricos por ecoregión

Región	Rango	d_g cm	N arb/ha	G m ² /ha	V m ³ /ha
Amazonía	Mínimo	20,9	221	10.2	56
	Media	25,1	396	19.5	127
	Máximo	31,0	634	25.9	202
Preandino amazónico	Mínimo	21,3	219	12.1	56
	Media	26,3	339	18.5	94
	Máximo	28,9	645	25.7	120
Transición chiquitano amazónica	Mínimo	21,4	113	9.9	37
	Media	25,0	261	12.7	66
	Máximo	33,9	392	15.9	101
Chiquitanía	Mínimo	21,2	162	9.2	30
	Media	25,7	292	15.2	57
	Máximo	37,9	469	21.6	102

d_g = diámetro cuadrático promedio, N = Abundancia, G = Área basal y V = Volumen (a partir de 10 cm de DAP)

3.4 Rangos de valores de biomasa y carbono almacenado

La biomasa área total del estrato arbóreo oscila entre promedios regionales de 97 a 171 toneladas por hectárea. Los promedios más altos de biomasa se registran en la Amazonía, le sigue el Preandino amazónico, la Chiquitanía y la Transición chiquitano amazónica (Cuadro 6).

De acuerdo a la tendencia de alturas de los bosques, volúmenes de madera y condiciones biofísicas, no pareciera coherente que los bosques de la Chiquitanía contengan mayor cantidad de biomasa que los bosques de la Transición chiquitano. Ello ocurre por que la Chiquitanía presenta con mayor frecuencia y abundancia especies con densidades básicas relativamente altas.

Según el método de cálculo los valores de carbono almacenado en la biomasa, fluctúan proporcionalmente a los valores de biomasa aérea total. Las medias por ecoregión varían desde 49 t/ha en la Transición chiquitano amazónica a 86 t/ha en la Amazonía.

El rango total entre las estimaciones realizadas varía entre un valor mínimo de 36 t/ha y un máximo de 114 t/ha de carbono almacenado.

Las frecuencias de valores de biomasa obtenidos en los inventarios y

distribuidos por categorías de peso muestran que las ecoregiones tienen distribuciones que más o menos difieren de la unimodal por el número reducido de inventarios forestales (Figura 3).

Las distribuciones de frecuencia muestran desde otro ángulo las tendencias de acumulación de biomasa por ecoregiones.

En la Amazonía las frecuencias se concentran en las categorías altas de biomasa, mientras que ocurre lo contrario en la Transición chiquitano amazónica.

A efectos de comparación con estas estimaciones logradas en bosques

bolivianos, mencionaremos valores de biomasa reportados para bosques húmedos tropicales de otros países y continentes (Brown et al. 1989; Brown y Lugo 1992):

En Asia varían de 36 t/ha en un bosque joven secundario en Sri Lanka hasta 382 t/ha en un bosque montano de alto nivel productivo de Malasia.

Los pocos valores dados para bosques primarios de Camerún y Guyana Francesa son bastante altos alcanzando cifras de casi 300t/ha.

Los volúmenes comerciales de fuste correspondientes a estos inventarios fluctúan entre 19 y 362 m³/ha.

Estimaciones de biomasa basadas en inventarios forestales realizados en el Brasil entre 1954 y 1960 en la parte sur del Río Amazonas entre Belem y Manaus con un área total de alrededor 13.2 millones de ha, reportaron valores de biomasa entre 175 y 397 t/ha con un promedio de 298 t/ha.

Otra estimación de los mismos autores en Brasil, basada en los inventarios del proyecto RADAM de los años setenta se refiere al bosque denso de la Amazonía brasileña donde se obtienen valores entre 166 y 332 t/ha, con un promedio de 227 t/ha.

Una parte de la variación dada entre

Cuadro 6. Valores de biomasa y carbono almacenado

Región	Rango	Bf t/ha	Bt t/ha	CBt T/ha
Amazonía	Mínimo	31	78	39
	Media	77	171	86
	Máximo	124	228	114
Preandino amazónico	Mínimo	30	86	43
	Media	48	129	64
	Máximo	65	191	95
Transición chiquitano amazónico	Mínimo	20	74	37
	Media	36	97	49
	Máximo	57	133	66
Chiquitanía	Mínimo	22	73	36
	Media	40	114	57
	Máximo	62	157	79

Bf = Biomasa de los fustes a partir de 10 cm DAP
Bt = Biomasa aérea total de los árboles a partir de 10 cm DAP
CBt = Carbono almacenado en la biomasa aérea total

valores máximos y mínimos, según los autores, puede ser explicada por diferencias climáticas, de sitio y composición florística del bosque. En muchos casos se puede observar una tendencia relacionada a un gradiente norte-sur, con valores cada vez más pequeños hacia las zonas más secas del sur. En la zona más austral del estudio de Guaporé (Brasil) que colinda con la parte nor-este de Pando (Bolivia) se estimaron 168 t/ha, valor muy semejante a las 171 t/ha encontradas en la ecoregión amazónica boliviana (Pando).

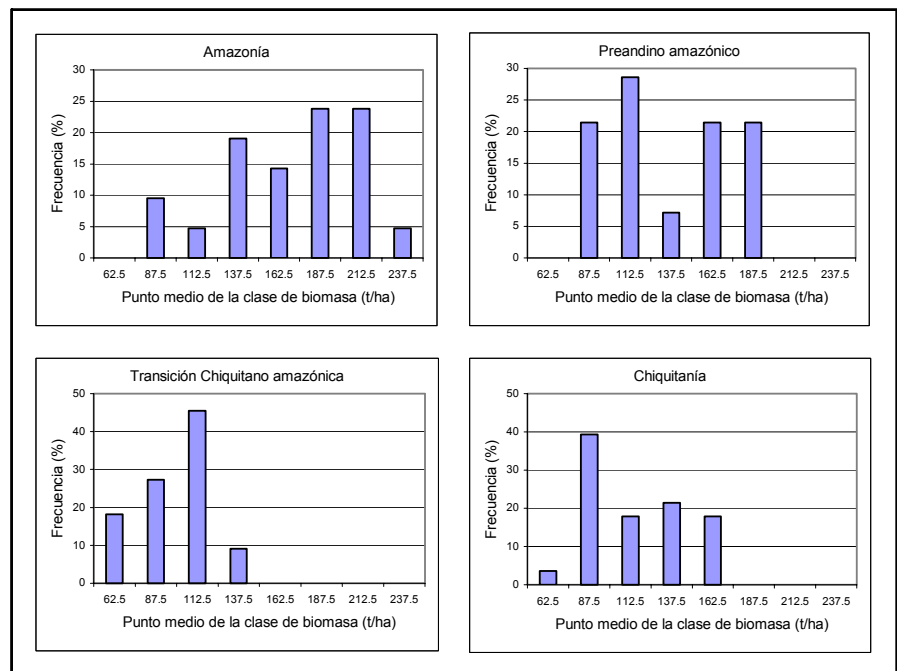
En Bolivia, el mencionado gradiente norte-sur también puede ser observado comparando los valores de biomasa aérea total alcanzados en la Amazonía, ecoregión con bosques húmedos con 171 t/ha y en la Transición chiquitano amazónica con 97 t/ha.

Los valores de biomasa relativamente bajos de Bolivia también se reflejan en bajos volúmenes de fuste comparados con valores inventariados en zonas ecuatoriales de Brasil u otros países tropicales donde 200 a 300 m³/ha no se consideran como excepción.

Según las experiencias de profesionales forestales bolivianos, se considera volúmenes de fustes altos aquellos por encima de 100 m³/ha, experiencia confirmada en este estudio que arrojó valores medios entre 57 m³/ha en Chiquitanía y 127 m³/ha en Amazonía.

Aplicando la función [3] de altura de Brown et al. (1.989) basada en datos de Venezuela, Puerto Rico y Papua Nueva Guinea, para generar valores de altura a utilizar en la función de biomasa [1] se consiguieron valores entre 21 a 51% más altos de biomasa que utilizando las ecuaciones locales de altura por ecoregión. Utilizando las ecuaciones de biomasa, basadas en solo la variable DAP ocurren diferencias más grandes todavía. Estas funciones implícitamente también incorporan las relaciones diámetro-

Figura 3. Distribuciones de frecuencia de biomasa aérea total por ecoregión (clases de 25t/ha)



altura, encontradas en los países de su origen, que aparentemente corresponden a condiciones casi óptimas del bosque tropical.

Otro aspecto interesante, mencionado en el estudio de Brown y Lugo (1.992) es la aparente disminución de la biomasa en función del tiempo, que en los estudios hechos en Brasil alcanzarían valores de reducción anual de 1%, descartando el azar como causa de las diferencias observadas.

Se menciona que la intervención humana, con tan solo la extracción de un árbol grande por ha cada 2 o 3 años, podría causar esta disminución.

En Bolivia donde faltan valores de comparación, seguramente también existe una disminución de biomasa en las áreas forestales a través del tiempo, que podrían ser adecuadamente evaluada en parcelas permanentes en bosques bajo manejo forestal.

Finalmente, nos referimos a la no inclusión en estas estimaciones de otros componentes de la biomasa del bosque como ser biomasa subterránea

(raíces), en descomposición (hojarasca, humus), de palmeras, lianas, arbustos y herbácea.

Según datos de Brown et al. (1.989), Brown y Lugo (1.992) estimaciones de biomasa de palmeras dan alrededor de 8 t/ha, considerando 100 palmeras/ha con 10 m altura, 20 cm DAP y 0,2 g/cm³; la biomasa de raíces puede alcanzar entre 10 a 50% de la biomasa aérea y la biomasa de madera muerta entre 10 a 40 %.

Estos datos muestran que la biomasa aérea del estrato arbóreo representa gran parte de la biomasa vegetal acumulada en los bosques tropicales y que existe dificultad e incertidumbre para cuantificar los otros componentes mencionados.

Hasta que existan estimaciones locales más exactas basadas en una suficiente cantidad de datos o estudios científicos, no es conveniente incluirlas en los análisis o estimaciones de biomasa, porque se puede perder bastante en términos de exactitud y efectividad de la estimación de la

Cuadro 8. Factores de expansión de Volumen

Región	Rango	Fev
Amazonía	Mínimo	1,08
	Media	1,20
	Máximo	1,36
Preandino amazónico	Mínimo	1,11
	Media	1,17
	Máximo	1,59
Transición chiquitano amazónica	Mínimo	1,06
	Media	1,18
	Máximo	1,32
Chiquitanía	Mínimo	1,04
	Media	1,17
	Máximo	1,33

Fev = Factor de expansión de volumen

biomasa forestal y ganar muy poco en estimación integral del ecosistema.

3.5 Factores de expansión

Los factores de expansión pueden reemplazar los datos de campo de los inventarios forestales requeridos para estimaciones de biomasa. Necesariamente requieren valores de densidad básica de la madera para transformar el volumen de fuste a valor de biomasa.

3.5.1 Factor de expansión de volumen

Muchos inventarios en Bolivia fueron realizados a partir de 20 cm de DAP como diámetro mínimo de levantamiento. Para estimar el volumen que corresponde a un DAP de 10 cm (el estándar internacional para la estimación de biomasa), se

multiplica el volumen por el factor de expansión de volumen. Los factores promedio de las cuatro regiones no varían mucho y están entre 1.17 y 1.20 (Cuadro 7).

3.5.2 Factor de expansión de biomasa

El factor de expansión de biomasa (Cuadro 8) convierte la biomasa de los fustes, en biomasa aérea total. Primero se calcula la biomasa de los fustes como producto del volumen desde 10 cm DAP por la densidad básica promedio de las especies. Si no hubiera informaciones sobre la densidad básica de las especies, se utiliza un promedio general para cada región (Cuadro 4).

Los factores de expansión de biomasa fluctúan entre 2.23 y 2.88. Los valores

Cuadro 7. Valores del Factor de expansión de biomasa

Región	Rango	Feb
Amazonía	Mínimo	1,52
	Media	2,23
	Máximo	3,66
Preandino amazónico	Mínimo	1,66
	Media	2,68
	Máximo	3,46
Transición chiquitano amazónica	Mínimo	2,03
	Media	2,71
	Máximo	4,92
Chiquitanía	Mínimo	1,88
	Media	2,88
	Máximo	4,17

Feb = Factor de expansión de biomasa

máximo y mínimo varían entre 1.52 a 4.92 (Cuadro 8). Como el factor de expansión de biomasa depende mucho de la dimensión media de los árboles del bosque, es conveniente utilizar una función que represente este factor en relación al diámetro medio del bosque o en función de la biomasa de los fustes (Brown et al., 1989; Brown y Lugo, 1992). La última relación es más útil todavía, porque siempre se dispone del volumen comercial por ha, y por tanto, la biomasa de los fustes por ha. Por esta razón se ha derivado una función de expansión de biomasa (Figura 4).

Esta función puede ser utilizada para los bosques húmedos del país, que corresponden a una de las cuatro ecoregiones analizadas (Figura 4).

La tabla de factores de expansión de biomasa para un rango de 10 a 150 toneladas de biomasa de fustes fue calculada tomando en cuenta los posibles valores promedios de este parámetro en bosques bolivianos (Cuadro 9).

Cuadro 9. Parámetros y valores de la función de expansión de biomasa

Feb = exp (2.3624 - 0.3436 ln(Bf) - 0.0044 ln ² (Bf))					
Bf	Feb	Bf	Feb	Bf	Feb
10	4.70	55	2.49	105	1.95
15	4.05	60	2.41	110	1.91
20	3.64	65	2.34	115	1.88
25	3.35	70	2.28	120	1.85
30	3.13	75	2.22	125	1.82
35	2.96	80	2.16	130	1.79
40	2.81	85	2.11	135	1.77
45	2.69	90	2.07	140	1.74
50	2.59	95	2.03	145	1.72
		100	1.99	150	1.70

Feb = Factor de expansión de biomasa
Bf = Biomasa de los fustes (t/ha)

3.5.3 Ejemplo de cálculo de biomasa a partir de factores de expansión

El siguiente ejemplo muestra la aplicación de los factores de expansión para el cálculo de la biomasa aérea total:

Supongamos que solamente conocemos el valor total del volumen por ha a partir de 20 cm DAP ($V_{DAP > 20 \text{ cm}}$) en cierta zona de la Amazonía boliviana, el cual sería $100 \text{ m}^3/\text{ha}$. Para estimar el volumen a partir de 10 cm DAP ($V_{DAP > 10 \text{ cm}}$) debemos multiplicar este valor con el factor de expansión de volumen (Fev):

$$V_{>10 \text{ cm}} = V_{DAP > 20 \text{ cm}} \cdot \text{Fev} = 100 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot 1,20 = 120 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Si no disponemos de valores de la densidad básica de las especies, podemos utilizar el promedio derivado para esta ecoregión que es de $0,606 \text{ t/m}^3$. Multiplicando este valor con el volumen de fustes a partir de 10 cm DAP, obtenemos la biomasa de los fustes (Bf):

$$\text{Bf} = V_{DAP > 10 \text{ cm}} \cdot \delta = 120 \text{ m}^3 \cdot 0,606 \text{ t/m}^3 = 72,72 \text{ t}$$

Para calcular la biomasa aérea total (Bt), multiplicamos la biomasa de los fustes con el factor de expansión de biomasa (Feb), que se obtiene del cuadro 8:

$$\text{Bt} = \text{Bf} \cdot \text{Feb} = 72,72 \text{ t} \cdot 2,25 = 163,62 \text{ t}$$

4. Conclusiones

La metodología de Brown et al., (1.989) y la aplicación de su ecuación más exacta ha permitido obtener estimaciones confiables de biomasa para bosques naturales de cuatro regiones del país.

Adicionalmente se ha logrado desarrollar una función de altura local que ha permitido tener mayor precisión en las estimaciones, y para aprovechar con más amplitud los datos de inventarios forestales, se calcularon los factores de expansión de volumen por ecoregión y una función de expansión de biomasa área total.

El sector forestal boliviano presenta una amplia capacidad de mitigación

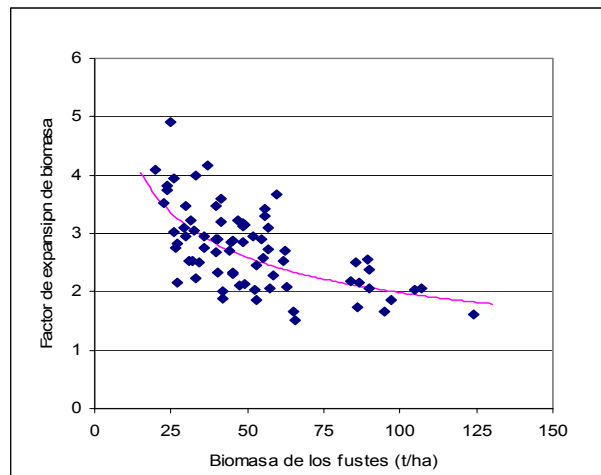


Figura 4. Función de expansión de biomasa

(prevención) dada su importante superficie de bosques naturales en actual producción maderable, no-maderable y de servicios ambientales. Estos bosques muestran una alta capacidad de almacenamiento de carbono pero también se muestran como los ecosistemas de mayor riesgo a conversión a otros usos y por tanto con un alto potencial de convertirse en fuentes de emisión de CO_2 y otros gases de efecto invernadero.

Referencias bibliográficas

Brown, S., Lugo, A. E. 1982. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica* 14: 161-187.

Brown S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. *FAO Forestry Paper* 134.

Brown S.; Gillespie A. J.; Lugo. A. E. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, Vol. 35, No. 4.

Brown S. y Lugo A. E. 1992. Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia*, Vol. 17, No. 1.

Davidson M. A. 1984. *Tropical timbers of the world*. United States Department of Agriculture

INIA_OIMT 1996. Manual de identificación de especies forestales de la sub región andina. Instituto Nacional de Investigación Agraria y Organización Internacional de las Maderas Tropicales. Lima, Perú.

MDSMA 1996. Nueva Ley Forestal. N° 1700, del 12 de Julio de 1996. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. La Paz.

MDSMA 1997. Mapa de Areas Protegidas de Bolivia. Coordinación y Edición: Máximo Liberman. Compilación Ecoregiones: Marco Ribera. Sistema Nacional de Areas Protegidas. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. La Paz.

MAGDR 1998. Información técnica para el procesamiento industrial de 94 especies alternativas de Bolivia. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. La Paz.

Superintendencia Forestal 1999. Potencial de los bosques naturales de Bolivia para producción forestal permanente. Edición y responsabilidad técnica: E., Dauber; R., Guzmán; J., Terán. Santa Cruz.

Agradecimientos

A la Dra. Sandra Brown por su apoyo y estímulo

A Javier Sánchez, Raúl Aguirre, Bruno Solíz, Gisella Ulloa, Thelmo Muñoz y Arturo Moscoso por la lectura y sugerencias.

Al Proyecto BOLFOR por co-financiar la consultoría de E. Dauber y el

financiamiento de la presente publicación.

A Fernando Pizarro quien elaboró la Figura 1.

ⁱ SUPERINTENDENCIA FORESTAL
Av. 2 de Agosto N° 6, pasando el Cuarto Anillo
Tel.: (00591) 3 – 488393, Fax: (00591) 3 – 488391, Email:
siforestal@cotas.com.bo
Casilla 7091. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

ⁱⁱ Brown et al. (1989) publicaron ecuaciones de biomasa para bosques en zonas de vida seca, húmeda y muy húmeda según zonificación de Holdridge (1967), basadas en el análisis de datos de 269 árboles provenientes de diferentes países tropicales. Las ecuaciones mencionadas se distinguen por el número de variables independientes, siendo estas: el “DAP”; “el DAP y la altura total”; “el DAP, la altura total y la densidad básica” de los árboles. En 1997 Brown et al. publicaron otras dos funciones basadas en el DAP solamente, que rinden resultados semejantes que la función correspondiente de 1989.

ⁱⁱⁱ “Potencial de los bosques naturales de Bolivia para producción forestal permanente” (Superintendencia Forestal, 1999).

^{iv} En este estudio la ecoregión Chiquitania tiene un valor de volumen más alto que la región productora Chiquitana publicado en el libro “Potencial de los bosques naturales de Bolivia para la producción forestal permanente”, debido a una definición y concepto geográfico distinto de esta región en ambos casos.