

MODELOS DE REGRESIÓN NO LINEAL PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA EN ALGUNOS ECOSISTEMAS BOSCOSOS DE COLOMBIA

Palabras clave: Biomasa, análisis de regresión, bosques, ecosistemas.

Key words: Biomass, non-linear regression, tropical forests.

*Javier D. Burgos¹
Julia Andrea Pérez Rojas²*

RESUMEN

El propósito de este trabajo es el de estimar, de manera preliminar, la reserva de biomasa forestal en algunos ecosistemas boscosos de Colombia; en principio se utilizó información primaria compilada en Institutos, Universidades y ONG's sobre inventarios florísticos realizados en diferentes partes del país en un período comprendido entre 1960 - 2000; con dicha información se estimó la biomasa forestal por medio de la aplicación de métodos indirectos propuestos por la Brown, et.al. (1997), encontrando que dicha metodología sobreestima la biomasa en 42.72% cuando se compara con la estimación hecha por cosecha, haciendo necesario desarrollar nuevos modelos matemáticos obtenidos mediante el uso de regresión no lineal con el fin de obtener métodos indirectos de estimación de biomasa que presenten una mejor concordancia con los métodos de cosecha.

ABSTRACT

The goal of this work is to estimate the biomass reserve for forest ecosystems from Colombia. As a first step, we used primary information obtained by research institution, universities and ONG's related with forest inventories for different regions of Colombia from 1960 to 2000. with this information, we estimate the forest Biomasa using the indirect methods developed by Brown et al (1997). We found that Brown's methodology overestimate almost 42% the forest biomass when compared with data from field harvesting. We developed here new mathematical

models derived by non linear analyses which showed a high concordance with biomass obtained by direct harvesting.

INTRODUCCION

El cambio climático se ha venido acentuando en las últimas décadas generado principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero, se han generado soluciones mundiales como el mecanismo de desarrollo limpio o MDL cuya función principal es la mitigación del cambio climático por medio de la reducción del CO₂, esta reducción debe ser medible y certificable en el tiempo, aquí juega un papel fundamental la estimación de biomasa forestal porque ésta, en últimas, se traduce en la cantidad de carbono removido en la atmósfera.

OBJETIVOS

Desarrollar modelos de regresión no lineal que permitan estimar de manera preliminar la biomasa boscosa de algunos ecosistemas boscosos, tanto naturales como plantados, para las cinco regiones biogeográficas del país, a partir de la utilización de métodos indirectos que suponen la utilización de datos como diámetro a la altura del pecho (DAP), área basal y volumen; aplicando la metodología de Brown et al. (1997).

Comparar la aplicación de la metodología de Brown et al. (1997) con ecuaciones halladas por modelos estadísticos a partir de los estudios de biomasa que se

1 Javier Burgos. Biólogo, Magíster en Matemáticas. Profesor de Estadística y Diseño Experimental. Proyecto curricular de Ingeniería Forestal. Universidad Distrital. e-mail: jdariob@udistrital.edu.co.

2 Julia Andrea Pérez Rojas, Auxiliar de Investigación. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Proyecto Curricular de Ingeniería Forestal. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

han realizado en el país y de esta manera determinar la confiabilidad de cada uno de los métodos y su posterior utilización para estimar la biomasa en Colombia.

METODOLOGÍA

A partir de la revisión bibliográfica de inventarios forestales en algunos ecosistemas boscosos. Los cálculos de biomasa se hicieron con la metodología de Brown, S. *et al.* (1997); a los datos de inventario (principalmente el volumen) para estimar de manera preliminar la biomasa de algunos ecosistemas boscosos.

La metodología consiste en la aplicación de la fórmula:
 $B = VOB * DB * FEB$

Donde: B = Biomasa (Ton/ha)

VOB = Volumen por hectárea. (m³/ha)

DB = Densidad básica de la madera. (g/cm

FEB = Factor de expansión de biomasa.

Se compararon estos resultados con aquellos obtenidos para los mismos ecosistemas mediante métodos de cosecha. Puesto que en esta comparación se observó que la metodología propuesta por Brown, S. *et al.* (1997), sobrestimaba los valores de biomasa, se realizaron ajustes por medio de análisis de regresión no-lineal, para obtener ecuaciones que permitieran estimar de manera más exacta la biomasa de los ecosistemas boscosos de Colombia, sin necesidad de cosechar el bosque, y así validar dicha metodología para ser aplicada a cualquier estudio de composición florística que contenga variables como volumen, área basal o diámetro a la altura del pecho (DAP).

RESULTADOS

ECUACIONES PARA ESTIMACIÓN DE BIOMASA

Dentro de los ajustes a la metodología de Brown, S. *et al.* (1997), este estudio determinó una ecuación

general para los bosques del país que permite estimar el valor de biomasa de las ramas y follaje expresado como un factor a partir de la biomasa del fuste, conociendo el volumen y la densidad de la madera, la ecuación de factor de expansión del fuste (FEB) presenta buena correlación y un bajo error estándar (Figura 1),

$$FEB = \frac{a * b + c * LnBF^d}{b + LnBF^d}$$

Donde:

a = 1,329	n _b = 46
b = 0,000049	R ² = 0.63
c = 1,62	S = 0.10
d = -8,89	BF = Biomasa del Fuste

Por otro lado se calculó una ecuación que permitiera conocer el factor de expansión del volumen para los casos en donde los inventarios reportaban únicamente las especies con DAP mayores de 30 y 40cm, las gráficas para estas ecuaciones se presentan en la Figura 2 y 3, estas proporcionaron altas correlaciones con un buen ajuste de los datos.

Ecuación FEV Para Inventarios DAP > 30cm

$$FEV_{30} = \frac{a * LnVOB_{30}}{b + LnVOB_{30}}$$

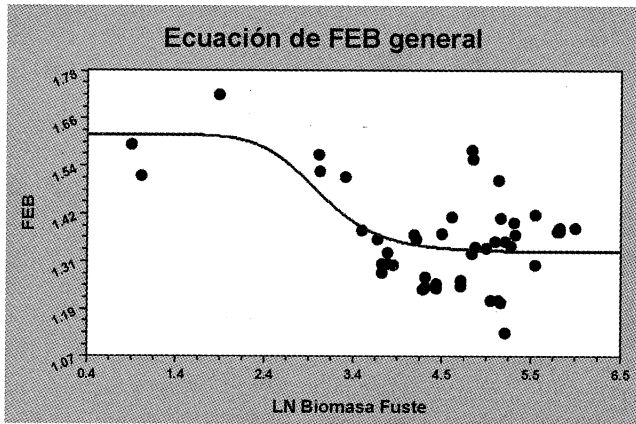
a = 0,72	S = 0.25
b = -2,54	R ² = 0.81
n _b = 38	VOB ₃₀ = Volumen a partir de 30cm de DAP.

Ecuación FEV Para Inventarios DAP > 40cm

$$FEV_{40} = \frac{a}{1 + b * \exp(-c * LnVOB_{40})}$$

a = 1,30	n _b = 31
b = -1,81	S = 0.69
c = 0,32	R ² = 0.99

En cuanto a inventarios que sólo contaban con variables como DAP o área basal (Figura 4), fue



$$FEB = \frac{a * b + c * LnBF^d}{b + LnBF^d}$$

Figura 1. Factor De Expansión Del Fuste (FEB)

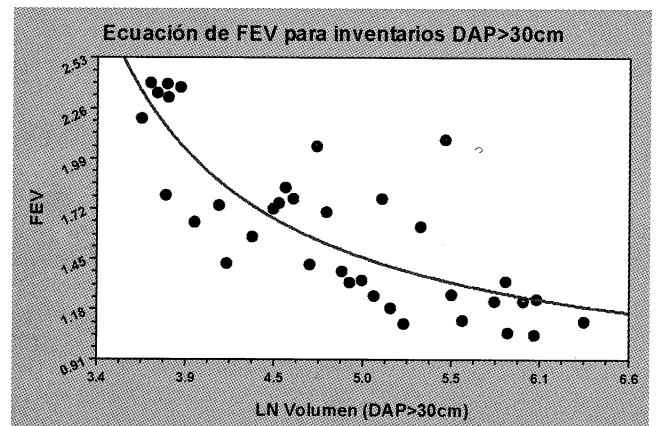
La biomasa del fuste a edades tempranas con relación a la biomasa del follaje y ramas es baja, presentando un valor de FEB alto (>1.76) que permanece constante para las primeras etapas de crecimiento; a medida que la biomasa del fuste aumenta, la proporción de follaje y ramas disminuye y el FEB se hace menor hasta encontrar un punto constante, mostrando una relación inversamente proporcional; este análisis concuerda con lo mencionado por Saldarriaga, J. G. *et al.* (1988) en donde señala que la proporción de biomasa del fuste es mayor con respecto a la biomasa total en los bosques maduros, en tanto que el porcentaje de biomasa para ramas y hojas es mayor en bosques jóvenes disminuyendo en forma de “J” invertida para bosques maduros.

necesario hallar una ecuación que permitiera estimar la biomasa a partir de éstas, la ecuación tuvo una aceptable correlación pero no buen ajuste de los datos, debido a la variabilidad de factores como la altura y densidad básica de los árboles que no son tomados en cuenta al calcular esta ecuación

Ecuación De Biomasa Del Fuste a Partir Del Área Basal

$$BF = a * LnAB^{b * LnAB}$$

a = 1,42	S= 31,77
b = 0,56	R ² = 0,71
n _b = 30	

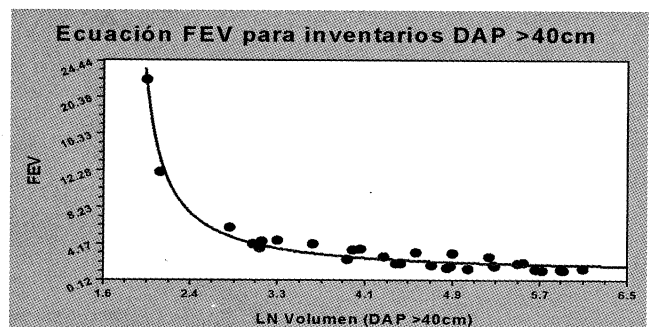


$$FEV_{30} = \frac{a * LnVOB_{30}}{b + LnVOB_{30}}$$

Figura 2. Ecuación FEV Para Inventarios DAP>30cm

Se observa que el FEV decrece a medida que el volumen aumenta, mostrando un comportamiento similar a la distribución de “J invertida” del volumen, lo que explica el 81% de la población y muestra un mayor ajuste que la ecuación expuesta por la metodología de Brown.

El valor de FEV estimado con Brown tiende a disminuir en un 13,5% el volumen de expansión, en contraste la ecuación estimada por este estudio tiende a aumentar en 1,23% este mismo volumen en relación con los inventarios realizados en campo; esto sugiere que los ajustes hechos por este estudio se aproximan mejor a los datos de volumen determinados en campo para los bosques de Colombia.



$$FEV_{40} = \frac{a}{1 + b * \exp(-c * LnVOB_{40})}$$

Figura 3. Ecuación FEV Para Inventarios DAP>40cm

Esta figura muestra un comportamiento “J invertida” típico del bosque para el volumen, ajustándose altamente a los datos, en donde se observa que a menor volumen se presenta un mayor FEV el cual decrece progresivamente a medida que aumenta el volumen.

Tabla 1. Valores De Biomasa (Ton/Ha) Por Regiones Para Bosque Natural.

REGION	AREA BASAL PROMEDIO (m ² /ha)	VOLUMEN PROMEDIO (m ³ /ha)	BIOMASA PROMEDIO (Ton/ha)
Amazonas	10,912	94,763	134,812
Andina	32,733	130,365	142,986
Atlántica	13,283	154,281	79,939
Orinoquía	18,756	83,625	100,908
Pacífica	12,373	124,861	119,694

BIOMASA PARA BOSQUE NATURAL

Luego del ajuste de la metodología de estimación de biomasa, se obtuvieron los resultados para bosque natural en las cinco regiones biogeográficas del país. Se incluyen los valores obtenidos para área basal, volumen y biomasa promedio por región. La **Tabla 1** presenta los valores de biomasa (Ton/ha) por regiones. La región que presentó un mayor valor de biomasa es la Andina con un rango entre 136–151 Ton/ha, seguida por la Amazónica con una distribución entre 118-150 Ton/ha, luego se encuentra la región Pacífica con un rango entre 111-130 Ton/ha, la región de la Orinoquía presenta el más amplio rango entre 78-125 Ton/ha, y por último la región Atlántica que presenta un rango entre 61 y 100 Ton/ha.

BIOMASA PARA BOSQUE PLANTADO

En cuanto a las plantaciones forestales del país, se aplicó la metodología propuesta por Brown, S. *et al.* (1997) debido a que se encontró un buen ajuste de la

biomasa estimada por este método con relación los resultados obtenidos a partir de métodos de cosecha. Los resultados incluyen variables como edad, volumen y biomasa promedio por región como se muestra en la **Tabla 2**. Se observa que los datos de biomasa para plantaciones, presentan un promedio general de 163,769 Ton/ha, donde el mayor promedio se presenta en la región Pacífica y el menor en la Orinoquía.

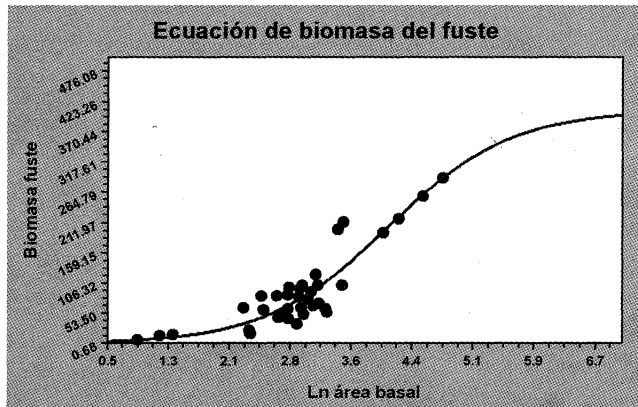
DISCUSIÓN

La **Figura 5** muestra el rango de biomasa para cada ecuación, tomando la mediana como punto de referencia para observar la desviación de los datos, obteniendo como resultado una mayor aproximación entre la biomasa medida en campo y la biomasa estimada en este estudio.

El número de datos utilizado en el análisis de comparación fue de 46, obteniendo un p-valor de

Tabla 2. Valores de biomasa (Ton/ha) de plantaciones por regiones

REGION	EDAD	VOLUMEN PROMEDIO (m ³ /ha)	BIOMASA PROMEDIO (Ton/ha)
Andina	12,3	309.05	191,592
Atlántica	7.99	147.32	109,437
Orinoquía	6.17	128.97	89,022
Pacífica	8.69	278.64	203,704



$$BF = a * LnAB^{b * LnAB}$$

Figura 4. Ecuación de Biomasa del Fuste a Partir del Área Basal.

Esta figura demuestra que a medida que el área basal aumenta la biomasa se incrementa hasta alcanzar un nivel constante. Sin embargo, los datos se muestran dispersos provocando un alto error debido a factores como la densidad básica promedio de la madera, la altura y factor forma de los árboles, ya que la biomasa del fuste incluye estos factores los cuales causan variabilidad en el valor de la biomasa total.

0.00013 menor de 0.05, significativo para un nivel de confianza del 95%; las medianas son:

Medianas de Biomasa (Tn/Ha)

Brown: 89,783

Métodos de Cosecha: 59,326

Presente estudio: 59,391

A partir de lo anterior se observa que el p-valor es altamente significativo y se acepta que las medianas son estadísticamente diferentes entre Brown y el presente estudio, entre Brown y el método de cosecha.

Los resultados de la variación en el incremento en los valores de biomasa se encuentran en la **Tabla 3**. Comparación de la biomasa estimada según la metodología de Brown vs la biomasa calculada por estudios en Colombia.

En esta tabla se observa que los datos de biomasa calculados con la metodología de Brown en su mayoría se incrementan en un porcentaje promedio de 42,72 %, y su relación es de 2:1 con respecto a la biomasa calculada por métodos de cosecha, es decir Brown sobrestima dos veces la biomasa cosechada. Se afirma que esta diferencia se debía a sobreestimación en los datos de volumen, densidad básica y a los coeficientes propuestos por Brown, los cuales fueron obtenidos en otros bosques tropicales. Es importante notar que Brown no explica adecuadamente el comportamiento de los bosques, ya que no se asigna un límite a los valores bajos de variables como biomasa del fuste y volumen, donde los factores son muy altos (FEB»9) y tienden a decrecer demasiado rápido, en consecuencia el valor de biomasa se incrementa considerablemente.

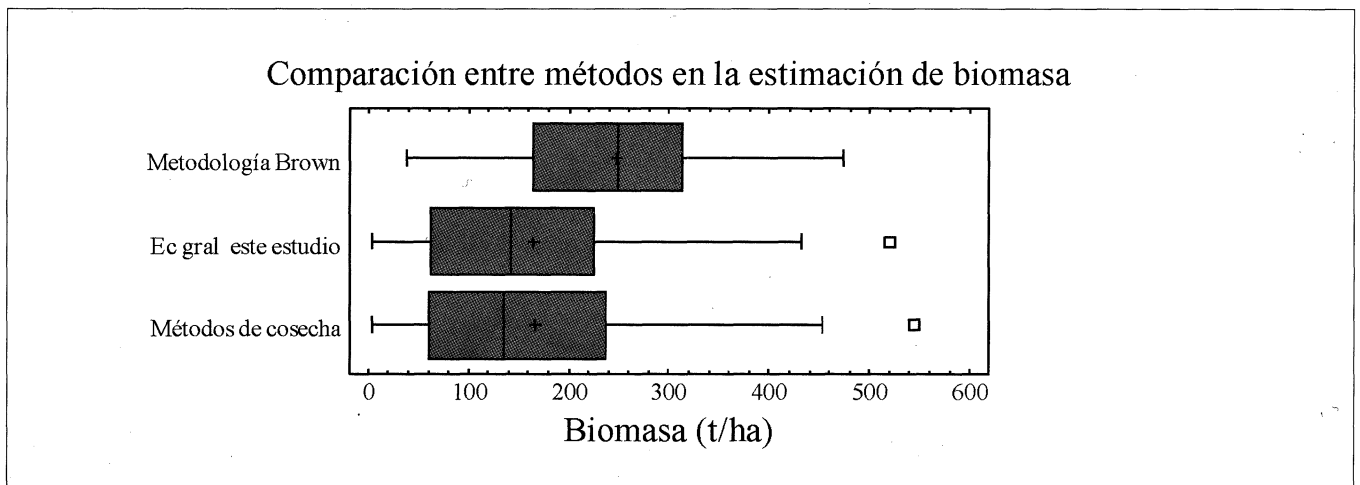


Figura 5. Comparación De La Biomasa Por Las Diferentes Ecuaciones

Tabla 3. Comparación de la biomasa estimada según la metodología de Brown vs la biomasa calculada por estudios en Colombia. (Ton/ha)*

Bibliografía	Bosque	Ubicación	Departamento	Zona de vida	Biomasa Total cosecha	Biomasa Total Brown	Incremento %, con Brown
De las Salas, Gonzalo, 1978	B. maduro	Carare-Opón	Santander	bh-T	159	264,548	39,897
	B. maduro	Carare-Opón	Santander	bh-T	167,5	269,937	37,948
	B. maduro	Carare-Opón	Santander	bh-T	321,8	378,658	15,016
Alvarez, C. 1999	B. maduro	Salento	Quindío	bmb-M	452,4	433,363	-4,393
	B. maduro	Salento	Quindío	bmb-M	450	433,448	-3,819
	B. maduro	Salento	Quindío	bmb-M	544,1	474,278	-14,722
	B. maduro altuvial	Aracaciara	Amazonas	bh-T	213,3	302,393	29,463
	B. maduro altuvial	Aracaciara	Amazonas	bh-T	236,8	311,834	24,062
JPM. Overman, JG, Saldarriaga, 1990.	B. maduro terraza alta	Aracaciara	Amazonas	bh-T	271,6	334,972	18,919
	B. maduro terraza baja	Aracaciara	Amazonas	bh-T	350,9	377,752	7,108
IGAC, Tropenbos, 1993.	B. maduro	Cartagena del Chaira	Caquetá	bh-T, bmb-T	191,2	267,148	28,429
	B. maduro	Solano	Caquetá	bh-T	117,6	223,810	47,455
Alvarez, C. 1999	B. maduro	Cartagena del Chaira	Caquetá	bh-T	190,6	265,005	28,077
	B. maduro	Calamar	Guaviare	bh-T	181,3	295,445	38,635
	B. maduro	Calamar	Guaviare	bh-T	196,1	307,132	36,151
	B. maduro	Calamar	Guaviare	bh-T	202,2	312,386	35,272
	B. maduro	Medio Atrato	Chocó	bmb-PM	247	308,428	19,916
	B. maduro	Medio Atrato	Chocó	bmb-PM	251,1	329,278	23,742
	B. maduro	Medio Atrato	Chocó	bmb-PM	268,9	337,018	20,212
	B. maduro	Medio Atrato	Chocó	bmb-PM	440,9	428,992	-2,776
	B. maduro	Bajo Calima	Valle	bp-T y bmb-T	190,7	287,825	33,744
	B. secundario 16 años	Carare Opón	Santander	bh-T	199,1	320,365	37,852
Rodríguez, L. 1988. De las Salas, G. 1978.	B. secundario 5 años	Carare Opón	Santander	bh-T	63,4	169,788	62,659
	B. secundario 8 años	Salento	Quindío	bmb-M	11,76	64,162	81,671
	B. secundario 8 años	Salento	Quindío	bmb-M	3,98	39,004	89,796
	B. secundario 8 años	Salento	Quindío	bmb-M	4,26	41,332	89,693
	B. secundario 10 años	Medio Atrato	Chocó	bmb-PM	238,5	319,648	25,387
	B. secundario 6 años	Medio Atrato	Chocó	bmb-PM	87,51	194,377	54,979
	B. secundario 4 años	Medio Atrato	Chocó	bmb-PM	136,7	237,374	42,412
	B. secundario 3 años	Calamar	Guaviare	bh-T	43,32	130,177	66,722
	B. secundario 3 años	Calamar	Guaviare	bh-T	33,28	112,199	70,338

*Fuente: Anzola, A. y Rodríguez, J. 2001. Estimación Preliminar De Biomasa En Ecosistemas Boscosos De Colombia. Tesis Para Optar Al Título De Ingeniero Forestal. Facultad Del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital.

CONCLUSIONES

Este estudio propone nuevas ecuaciones para estimar biomasa a partir de otras variables como son el volumen y el área basal de los bosques, esto permite una aproximación al valor de biomasa sin la necesidad de realizar trabajos de campo dispendiosos.

La estimación de biomasa a través de métodos indirectos como las ecuaciones alométricas se ve afectada por factores como volumen, densidad básica y el coeficiente de expansión del árbol (FEB); siendo este último el principal causante de la variación en los resultados de biomasa.

Se determinó una ecuación para el FEB de aplicación general para los bosques del país.

El factor de expansión del volumen (FEV) es importante para cuantificar los valores de volumen de individuos de diámetros pequeños (<30cm) no incluidos en algunos inventarios; la determinación de las ecuaciones para la estimación del FEV mostró altos niveles de correlación con un mínimo error.

Se generó una ecuación para estimar biomasa cuando se cuenta con área basal como único parámetro cuantitativo. Es importante tener en cuenta el grado de correlación y error determinado en esta ecuación para hacer un uso adecuado de los resultados sobre los valores de biomasa hallados.

La biomasa estimada es un producto forestal valioso (no maderero) en la captura de carbono, que valora

al bosque como un recurso biológico que debe conservarse. Los beneficios adicionales de conservación de la diversidad biológica, protección del medio ambiente y desarrollo sustentable hacen que los proyectos forestales sean aún más atractivos como estrategia en lo relacionado al cambio climático.

Se recomienda la aplicación de estas ecuaciones a otros inventarios que se encuentren para ampliar la información sobre valores de biomasa y así cubrir mayor parte de los bosques del país.

A partir de la biomasa estimada y obteniendo datos de crecimiento anual del bosque en el país profundizar acerca de la productividad primaria neta de los ecosistemas boscosos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANZOLA, A. Y RODRÍGUEZ, J. 2001. Estimación preliminar de biomasa en ecosistemas boscosos de Colombia. Tesis para optar al título de Ingeniero Forestal. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital.

BROWN, S. et al. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forest. A primer. A forest Resources Assessment publication. FAO. 54 p.

SALDARRIAGA, J. G. Et al. 1988. Long Term Chrono Sequence of Forest Succession in the Upper Rio Negro of Colombia And Venezuela en, Journal Ecology Vo. 76 No. 4 Dic 1988. pp. 938-958.