



Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

ESCUELA DE POSGRADO

**Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos
especies nativas en plantaciones forestales del trópico de
Cochabamba, Bolivia**

por

Gustavo Alvarez

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado
como requisito para optar por el grado de

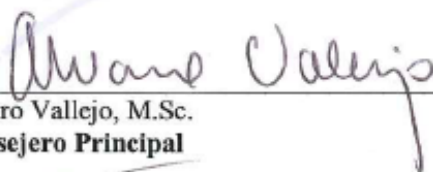
Magister Scientiae en Manejo y Conservación de
Bosques Naturales y Biodiversidad

Turrialba, Costa Rica, 2008

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y CONSERVACIÓN
DE BOSQUES TROPICALES Y BIODIVERSIDAD**

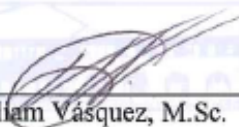
FIRMANTES:



Alvaro Vallejo, M.Sc.
Consejero Principal




Fernando Casanoves, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



William Vásquez, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

Centro Agronómico Tropical de
Investigación y Enseñanza
CATIE

Efraín Zelada, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Glenn Galloway, Ph.D.
Decano de la Escuela de Posgrado



Gustavo Alvarez Condo
Candidato

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación es dedicado a mis adorados

padres Carlos y Victoria (Q.E.P.D.)

y hermanos.

AGRADECIMIENTOS

A mi profesor consejero M.Sc. Álvaro Vallejo por su tiempo, comprensión y guía para el desarrollo de este trabajo de investigación.

A los miembros de mi comité asesor Dr. Fernando Casanoves, M.Sc. William Vásquez y M.Sc. Efraín Zelada por sus valiosas sugerencias y aportes al desarrollo de esta investigación.

Al Proyecto aprovechamiento integral y sostenible de recursos forestales en el trópico de Cochabamba, por brindarme la oportunidad de desarrollar el presente trabajo de investigación.

A mis compañeros, amigos y compatriotas que me acompañaron este hermoso e interesante desafío.

A la Cooperación Técnica Belga (CTB) y al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) por darme la oportunidad de concluir esta maestría.

CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
CONTENIDO	V
RESUMEN	VII
SUMMARY	VIII
ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	XII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos del estudio.....	2
1.1.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.2 Hipótesis del estudio	3
2 MARCO CONCEPTUAL	4
2.1 Los bosques y el cambio climático	4
2.2 Plantaciones forestales	6
2.3 Descripción de las especies forestales estudiadas.....	8
2.3.1 <i>Breve descripción de Schizolobium parahyba</i>	8
2.3.2 <i>Breve descripción de Centrolobium tomentosum</i>	10
2.4 Biomasa forestal.....	12
2.5 Métodos para la estimación de la biomasa de árboles sobre el suelo	13
2.5.1 <i>Método tradicional</i>	14
2.5.2 <i>Método destructivo</i>	14
2.5.3 <i>Estimación de la biomasa a través de sensores remotos</i>	14
2.6 Modelos alométricos para la estimación de volumen	15
2.7 Modelos alométricos para la estimación de la biomasa	17
2.8 Evaluación de los modelos alométricos	19
2.9 Densidad básica de la madera y contenido de carbono en la biomasa.....	22
2.10 Factor de expansión de la biomasa	23
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	25

3.1	Localización del área de estudio	25
3.2	Características del área de estudio	25
3.3	Instrumentos y materiales	26
3.4	Selección de las especies, los rodales y las parcelas temporales.	26
3.5	Selección de los árboles para el muestreo destructivo	28
3.6	Muestreo en campo	29
3.7	Procesamiento de las muestras.....	31
3.8	Análisis de datos	35
3.8.1	<i>Ajuste de modelos de volumen y biomasa aérea.....</i>	<i>35</i>
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1	Densidades básicas de la madera de las especies estudiadas	37
4.2	Contenido de carbono en la biomasa aérea de las especies estudiadas.....	39
4.3	Modelos alométricos para la estimación de volumen comercial	41
4.3.1	<i>Modelos de volumen comercial para Centrolobium tomentosum</i>	<i>42</i>
4.3.2	<i>Modelos de volumen comercial para Schizolobium parahyba</i>	<i>44</i>
4.4	Biomasa aérea y FEB para <i>Centrolobium tomentosum</i> y <i>Schizolobium parahyba</i>	47
4.5	Modelos alométricos para la estimación de la biomasa aérea	50
4.5.1	<i>Modelos alométricos de biomasa aérea para Centrolobium tomentosum</i>	<i>51</i>
4.5.2	<i>Modelos alométricos de biomasa aérea para Schizolobium parahyba</i>	<i>53</i>
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
5.1	Conclusiones	57
5.2	Recomendaciones.....	58
6	BIBLIOGRAFÍA	60
	ANEXOS	70

Alvarez, G. 2008. Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 89 p.

Palabras claves: *Centrolobium tomentosum*, *Schizolobium parahyba*, plantaciones forestales, densidad de la madera, contenido de carbono en la biomasa, biomasa aérea, modelos alométricos.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó con el fin de generar parámetros técnicos y modelos alométricos de biomasa aérea a través del método destructivo de árboles, para estimar la remoción de dióxido de carbono de dos especies arbóreas nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. Un total de 51 árboles fueron apeados para el análisis; 26 árboles para la especie *Centrolobium tomentosum* (árboles con dap entre 10.1 y 36.6 cm) y 25 para *Schizolobium parahyba* (árboles con dap entre 13.4 y 54.4 cm). Se determinó que la densidad básica de la madera para las especies estudiadas con muestras de fustes y ramas fue 0.46 g/cm³ para *Centrolobium tomentosum* y 0.36 g/cm³ *Schizolobium parahyba*. El carbono orgánico en la biomasa fue 51.80 y 50.15 % para la especies *Centrolobium tomentosum* y *Schizolobium parahyba* respectivamente y se encontraron diferencias significativas entre las especies estudiadas y componentes del árbol. El mayor porcentaje de la biomasa se encuentra en el fuste (53% en la especie *Centrolobium tomentosum* y 56% en la especie *Schizolobium parahyba*). Los modelos alométricos ajustados para predecir el volumen comercial y la biomasa aérea de las dos especies nativas, mostraron altos coeficientes de determinación ajustado (R² ajustado) mayores a 0.88 y 0.96 para *Centrolobium tomentosum* y *Schizolobium parahyba* respectivamente. Los modelos alométricos ajustados para cada especie pueden ser utilizados en condiciones similares a las del presente estudio para estimar el volumen comercial y la biomasa aérea de manera confiable.

Alvarez, G. 2008. Allometric models for estimating biomass of two native species in forest plantations in the tropics of Cochabamba, Bolivia. Thesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 89 p.

Key words: *Centrolobium tomentosum*, *Schizolobium parahyba*, forest plantations, wood density, carbon content in the biomass, biomass, allometric models.

SUMMARY

This research work was carried out in order to generate technical parameters and allometric models for aboveground biomass, through destructive tree sampling to estimate the carbon sequestration for two native tree species in forest plantations of the Tropic of Cochabamba, Bolivia. A total of 51 trees were felled for the analysis; 26 trees of *Centrolobium tomentosum* (trees with dbh between 10.1 and 36.6 cm) and 25 of *Schizolobium parahyba* (trees with dbh between 13.4 and 54.4 cm). It was determined that the wood density for the studied species, with samples of trunk and branches was 0.46 g/cm³ for *Centrolobium tomentosum* and 0.36 g/cm³ for *Schizolobium parahyba*. Carbon fraction for all biomass was 51.80 and 50.15% for the species *Centrolobium tomentosum* and *Schizolobium parahyba* respectively and there were significant differences between the species studied and by tree components. The highest percentage of the biomass is located in the trunk (53% in the *Centrolobium tomentosum* and 56% in the *Schizolobium parahyba*). Adjusted allometric models for volume and aboveground biomass for both species, showed high rates of adjusted determination coefficients (adjusted R²) higher than 0.88 and 0.96 for *Centrolobium tomentosum* and *Schizolobium parahyba* respectively. Adjusted allometric models for each species can be used under conditions similar to those in this study to estimate volume and aboveground biomass reliably.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Crecimiento promedio de <i>Centrolobium tomentosum</i> en el trópico de Cochabamba, Bolivia.....	12
Cuadro 2. Modelos alométricos ajustados para la estimación de la biomasa aérea y volumen.	36
Cuadro 3. Ámbito de validez de los datos para las especies estudiadas.....	37
Cuadro 4. Estadística descriptiva para la de densidad básica de la madera de las especies estudiadas.....	37
Cuadro 5. Comparación de medias (LSD Fisher) entre las edades	38
Cuadro 6. Comparación de medias (LSD Fisher) entre los componentes del árbol.....	39
Cuadro 7. Contenido de carbono orgánico en la biomasa de las especies estudiadas	40
Cuadro 8. Estadística descriptiva para el contenido de carbono (%) en la biomasa de las especies estudiadas	40
Cuadro 9. Ámbito de validez de los modelos probados	41
Cuadro 10. Modelos alométricos de volumen y estadísticos obtenidos para <i>Centrolobium tomentosum</i>	43
Cuadro 11. Modelos alométricos de volumen comercial y estadígrafos obtenidos para <i>Schizolobium parahyba</i>	46
Cuadro 12. Participación de los componentes del árbol en la biomasa aérea de las especies estudiadas.....	48
Cuadro 13. Participación de los componentes del árbol en la biomasa aérea de las especies estudiadas.....	49
Cuadro 14. Variables de los datos para la estimación de biomasa aérea de las especies estudiadas.....	50
Cuadro 15. Modelos alométricos de biomasa total y estadígrafos obtenidos para <i>Centrolobium tomentosum</i>	52

Cuadro 16. Modelos alométricos de biomasa total y estadígrafos obtenidos para <i>Schizolobium parahyba</i>	55
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo biogeoquímico de carbono.....	4
Figura 2. Plantaciones de <i>Centrolobium tomentosum</i> en el Municipio de Chimoré, trópico de Cochabamba.	7
Figura 3. Distribución de <i>Schizolobium parahyba</i> en Bolivia (Justiniano et ál., 2001).	8
Figura 4. Fuste de <i>Schizolobium parahyba</i> en trópico de Cochabamba, Bolivia.	9
Figura 5. Fuste de <i>Centrolobium tomentosum</i> en trópico de Cochabamba, Bolivia.	11
Figura 6. La biomasa en función del dap y la altura sin transformación y con transformación logarítmica. Fuente: Bell et ál. (1984) citado por UNC (2003).....	18
Figura 7. Localización del área de estudio, trópico de Cochabamba, Bolivia.....	25
Figura 8. Esquema de la parcela temporal.	27
Figura 9. Distribución diamétrica de los árboles de <i>Centrolobium tomentosum</i> muestreados. .	28
Figura 10. Distribución diamétrica de los árboles de <i>Schizolobium parahyba</i> muestreados. ...	28
Figura 11. Diagrama de dispersión del dap versus edad para <i>Centrolobium tomentosum</i>	29
Figura 12. Diagrama de dispersión del dap versus edad para <i>Schizolobium parahyba</i>	29
Figura 13. Componentes del árbol para <i>Centrolobium tomentosum</i>	30
Figura 14. Horno y balanza de precisión para la determinación de contenido de humedad.....	31
Figura 15. Calibrador digital para medir las dimensiones de la probeta.	32
Figura 16. Variación de la densidad básica para las especies estudiadas.	39
Figura 17. Variación del contenido de carbono orgánico en la biomasa y sus correspondientes medias para las especies estudiadas.....	41

Figura 18. Relación entre volumen comercial y dap de <i>Centrolobium tomentosum</i>	42
Figura 19. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y hc para el Modelo 1. .	43
Figura 20. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y hc para el Modelo 2. .	43
Figura 21. Dispersión del vc en función del dap para el Modelo 3 (a) y el Modelo 4 (b).....	44
Figura 22. Distribución del volumen comercial con respecto al dap de <i>Schizolobium parahyba</i>	45
Figura 23. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y hc para el Modelo 1. .	45
Figura 24. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y LN_hc para el Modelo 2.	46
Figura 25. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap para el Modelo 3 (a) y Modelo 4 (b).	46
Figura 26. Participación de los componentes del árbol en la biomasa aérea de <i>Centrolobium tomentosum</i> (a) y <i>Schizolobium parahyba</i> (b).	48
Figura 27. Distribución del factor de expansión de biomasa en las especies estudiadas.	50
Figura 28. Distribución de la biomasa aérea con respecto a dap de <i>Centrolobium tomentosum</i> .51	
Figura 29. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap para el Modelo 1 (a) y Modelo 3 (b).	52
Figura 30. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y hc para el Modelo 2. .	52
Figura 31. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y hc para el Modelo 4. .	53
Figura 32. Distribución de la biomasa aérea con respecto a dap de <i>Schizolobium parahyba</i> . .	54
Figura 33. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y ht para el Modelo 1...	55
Figura 34. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y ht para el Modelo 3...	55
Figura 35. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap para el Modelo 2 (a) y Modelo 4 (b).	56

LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS

ACLO = Acción Cultura Loyola
AIC = Criterio de información de Akaike
BIC = Criterio de información de Schwarz
CATIE = Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza
CETEFOR = Centro Técnico Forestal
CORDECH = Corporación Regional de Desarrollo de Chuquisaca
CORDECO = Corporación Regional de Desarrollo de Cochabamba
dap = Diámetro a la altura del pecho
DESEC = Centro para el Desarrollo Social y Económico
ECMP = Error Cuadrático Medio de Predicción
ESFOR = Escuela de Ciencias Forestales
FAO = *Food and Agriculture Organization*
FCA = Facultad de Ciencias Agrícolas
FEB = Factor de expansión de biomasa
GEI = Gases de efecto invernadero
GPS = *Global Positioning System*
hc = Altura comercial
ht = Altura total
IPCC = *Intergovernmental Panel on Climate Change*
IPTK = Instituto Politécnico Tomás Katari
MDL = Mecanismo de Desarrollo Limpio
PERT = Programa Ejecutivo de Rehabilitación de Tierras
Pg = Petagramo
PLAFOR = Plan Agroforestal Chuquisaca
PROFOR = Programa de Repoblamiento Forestal
PSE = Pago por Servicios Ecosistémicos
RED = Reducción de las Emisiones provocadas por la Deforestación
UACH = Universidad Austral de Chile

UNC = Universidad Nacional de Colombia

UNFCCC = *United Nations Framework Convention on Climate Change*

UMSS = Universidad Mayor de San Simón

1 INTRODUCCIÓN

El clima mundial ha evolucionado siempre de forma natural. Los científicos saben, no obstante, que ahora estamos asistiendo a un nuevo tipo de cambio climático. Sus efectos en la población y en los ecosistemas han comenzado a ser drásticos. Los niveles de dióxido de carbono (CO₂) y de otros gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera han subido vertiginosamente desde la revolución industrial (UNFCCC, 2004). El CO₂ es el gas de efecto invernadero antropogénico más importante. La concentración atmosférica global de este gas, aumentó de 280 ppm (valor preindustrial) a 379 ppm en el año 2005 (IPCC, 2007).

El CO₂ presente en la atmósfera es absorbido por las plantas, a través del proceso de fotosíntesis (Gayoso y Guerra, 2005). Por lo tanto, los bosques juegan un papel muy importante en el ciclo global de carbono. Desafortunadamente, a nivel mundial, muchos de estos ecosistemas han sido alterados o destruidos a través del tiempo; por ejemplo, para el trópico de Cochabamba, se estima que en los últimos 20 años de colonización se ha producido un promedio de deforestación de 10 a 15 mil has/año, alcanzando a la fecha aproximadamente 300 mil ha deforestadas, con propósitos de habilitación de tierras para la agricultura y ganadería (Fundación CETEFOR, 2006; Coca y Dávalos, 2007). Esta superficie representa el 56% de pérdida de los bosques primarios y se estima que a este ritmo de deforestación en un periodo de 15 a 20 años se registraría la pérdida casi completa de los bosques naturales de esta área administrativa (Coca y Dávalos, 2007).

Tal situación se puede revertir convirtiendo áreas degradadas en sumidero de carbono para reducir la cantidad de CO₂ presente en la atmósfera, a través de plantaciones forestales con especies nativas y exóticas. Pero, para ello es importante conocer la cantidad de biomasa acumulada en cada una de las especies. La cantidad de biomasa que una hectárea produce en un año es uno de los indicadores que se usan para medir la productividad de una comunidad vegetal y sirve también para estimar la cantidad de CO₂ que ésta fija. Un primer paso para conocer la biomasa de una comunidad es la determinación de modelos alométricos para la estimación de biomasa individual de sus árboles (Brown, 1997a).

Los modelos alométricos ayudan en el cálculo de la biomasa de grandes áreas forestales, valiéndose de la correlación existente entre las variables de difícil medición (pesos)

y aquellas directamente medidas en inventarios forestales (diámetro a la altura del pecho y altura comercial o total) (Watzlawick et ál., 2001). No obstante, su disponibilidad para especies maderables nativas es nula o muy reducida.

El empleo de los modelos alométricos desarrollados en regiones diferentes para la estimación de la biomasa presenta limitaciones debido a las distintas condiciones que rigen el crecimiento de los árboles entre las cuales se incluyen la genética, las subpoblaciones locales, el clima y los suelos. Estos factores son determinantes en el incremento de la biomasa y por tanto en la fijación de CO₂. De ahí la importancia de la generación de modelos alométricos locales.

Además, los proyectos de captura de carbono que se generan en el marco del Mecanismo para un Desarrollo Limpio establecido en el Protocolo de Kioto, requieren de información básica sólida sobre las plantaciones forestales y su biomasa, la que debe estar fundamentada sobre evaluaciones cuantitativas confiables. Tanto las metodologías, como las propias mediciones de la biomasa forestal y los inventarios de monitoreo son la base de confianza de toda negociación de proyectos de captura de emisiones de GEI (Guerra, 2001). Sin embargo, con mucha frecuencia no se cuenta con estas metodologías e información en áreas potenciales para la implementación de estos proyectos.

El presente estudio pretende llenar los vacíos a través de la información, los modelos alométricos de biomasa y los parámetros generados (densidad básica de la madera, carbono orgánico en la biomasa y factor de expansión de biomasa), para facilitar la elaboración de proyectos bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), Pago por Servicios Ecosistémicos (PSE) y la Reducción de las Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD).

1.1 Objetivos del estudio

1.1.1 Objetivo general

Generar parámetros técnicos y modelos alométricos de biomasa aérea, a través del método destructivo de árboles, para estimar la captura de dióxido de carbono de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia.

1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar la densidad básica de la madera de *Centrolobium tomentosum* y *Shizolobium parahyba*.
- ✓ Determinar el carbono orgánico presente en la biomasa aérea de *Centrolobium tomentosum* y *Shizolobium parahyba*.
- ✓ Ajustar modelos alométricos de volumen comercial y biomasa aérea a partir de las variables de fácil medición, para las especies estudiadas.
- ✓ Determinar el factor de expansión de la biomasa para *Centrolobium tomentosum* y *Shizolobium parahyba*.

1.2 Hipótesis del estudio

- ✓ Existe una relación directa entre la densidad básica de la madera y el contenido de carbono en las especies estudiadas.
- ✓ El promedio de carbono orgánico presente en la biomasa aérea varía entre las especies y los componentes del árbol (fuste, ramas y hojas).
- ✓ Existe una relación directa entre el diámetro y la altura del árbol con la biomasa en el fuste y la biomasa total del árbol arriba del suelo.

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 Los bosques y el cambio climático

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, tal como evidencian ahora las observaciones de los incrementos en las temperaturas medias del aire, los océanos, el derretimiento generalizado del hielo y la nieve, y el incremento medio global del nivel del mar (IPCC, 2007). Los bosques y el cambio climático están íntimamente ligados. Por esta razón, desde el primer momento en que se debate sobre el cambio climático, se hace referencia al rol de los bosques frente a éste (Giró, 2007), pero para comprender cómo se relacionan los bosques y el cambio climático es importante entender cómo funciona el ciclo de carbono en la naturaleza (Figura 1).

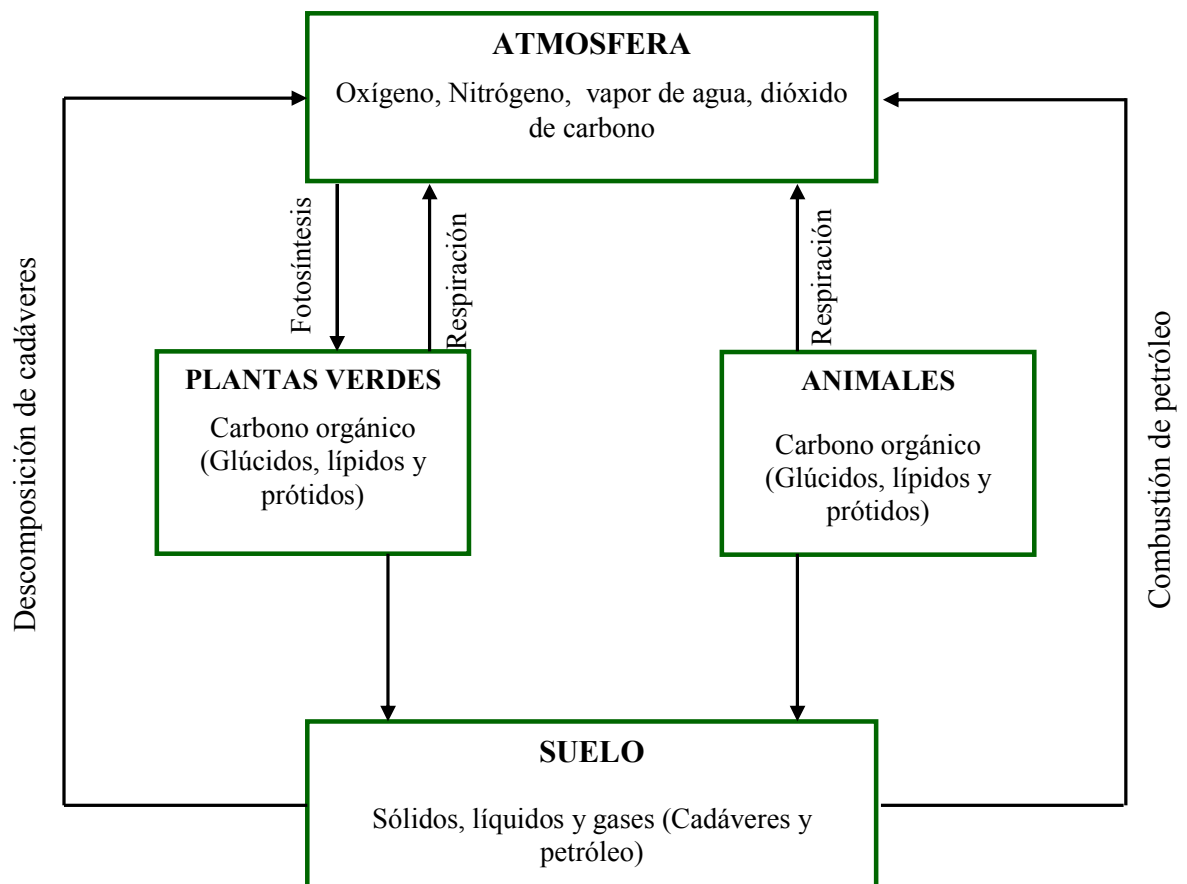


Figura 1. Ciclo biogeoquímico de carbono.

El ciclo de carbono descrito influye de la siguiente manera sobre el clima: Según la FAO (2007b), actualmente contribuyen con 1/5 de las emisiones de carbono cuando han sido talados, debido a que aproximadamente el 50% de la biomasa es carbono; reaccionan sensiblemente a los cambios climáticos cuando se los maneja de forma sostenible; producen madera para combustible que es más benigna que los combustibles fósiles; y, por último, tienen el potencial de absorber carbono en su biomasa y almacenarlo.

Según Brown (1997b), los bosques contribuyen potencialmente al cambio climático global gracias a su influencia sobre el ciclo global del carbono. Dado que almacenan grandes cantidades de carbono en la vegetación y el suelo, intercambian carbono con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración, son fuentes de carbono atmosférico cuando se les perturba, se convierten en sumideros de carbono atmosférico durante el abandono y regeneración después de la perturbación y pueden ser manejados para alterar su papel en el ciclo del carbono. Los bosques mundiales contienen alrededor de 830 Pg C (10^{15} g) en su vegetación y suelo, con aproximadamente 1.5 veces más en el suelo que en la vegetación. Durante los años ochenta, el análisis de las provisiones de carbono demostró que los bosques de los países templados y boreales constituían un sumidero neto de carbono atmosférico de unos 0.7 Pg año^{-1} , mientras que los trópicos significaban un foco de emisión neta de alrededor de 1.6 Pg año^{-1} . No obstante, esto puede cambiar en el futuro, cuando los bosques templados y boreales alcancen su madurez y se conviertan en un sumidero menor de carbono, si las tasas de deforestación y degradación tropical continúan acelerándose.

Estudios recientes sugieren que existe potencial para manejar los bosques con el fin de conservar y captar el carbono para mitigar las emisiones de CO_2 en una cuantía equivalente entre el 11 y 15% de las emisiones de combustibles fósiles. La adopción decidida de estas opciones de ordenación forestal es necesaria para evitar que los bosques se conviertan en el futuro en una fuente importante neta de CO_2 a la atmósfera y contribuyan al cambio climático.

Hay pruebas crecientes de que los bosques quedarán afectados profundamente por el cambio climático, por trastornos como los daños crecientes a la salud de los bosques, causados por el aumento de los incendios, plagas y enfermedades y además por la incapacidad de muchos de ellos para adaptarse a las nuevas condiciones climáticas derivadas del cambio climático. Al mismo tiempo, las nuevas inversiones en los bosques para mitigar el cambio

climático siguen a la zaga respecto a las expectativas optimistas de muchos, tras la entrada en vigor del protocolo de Kioto en 2005 (FAO, 2007)

2.2 Plantaciones forestales

Una plantación forestal se define, según FAO (2001), como un bosque establecido mediante plantación y/o siembra en el proceso de forestación o reforestación. Está integrada por especies introducidas o en algunos casos autóctonas.

La superficie de los bosques plantados sigue aumentando, y su aportación a la producción mundial de madera está acercándose al 50% del total. La nueva información recogida en 2005 sobre las tendencias en cuanto a los bosques plantados, indica que las superficies de bosques plantados para fines de producción y protección están ambos creciendo constantemente en todas las regiones excepto en África. La superficie forestal mundial plantada se estima en aproximadamente 270 millones de hectáreas. Alrededor del 76% de esta superficie se la ordena con propósitos productivos, principalmente para abastecer de madera y fibra a la industria de elaboración, y aproximadamente el 24% con propósitos de protección, en especial la conservación del suelo y el agua. Aproximadamente la mitad de los bosques plantados son de propiedad del Estado, mientras que pequeños propietarios cuentan con el 32% y grandes compañías privadas el resto. Asia, el Pacífico y Europa poseen la vasta mayoría de la superficie forestal plantada en el mundo. *Pinus*, *Cunninghamia*, *Eucalyptus* y *Acacia* son los géneros predominantes plantados con fines de producción, mientras que *Pinus*, *Clyptomeria*, *Populus* y *Chamaecyparis* son los géneros predominantes plantados con fines de conservación (FAO, 2007).

Las plantaciones forestales en Bolivia han sido encaradas por distintos programas y proyectos, entre ellos: El Centro para el Desarrollo Social y Económico (DESEC), el Programa de Repoblamiento Forestal (PROFOR), la Corporación Regional de Desarrollo de Cochabamba (CORDECO), el Plan Agroforestal Chuquisaca (PLAFOR), la Corporación Regional de Desarrollo de Chuquisaca (CORDECH), el Instituto Politécnico Tomás Katari (IPTK), la Acción Cultura Loyola (ACLO), el Programa Ejecutivo de Rehabilitación de Tierras (PERT), la FAO y otras. Las plantaciones forestales fueron establecidas tanto en zonas tropicales (Figura 2) como en los valles interandinos. Bolivia cuenta con aproximadamente

20000 ha reforestadas, distribuidas de la siguiente manera; Cochabamba 54%, Chuquisaca 37%, Tarija 6%, Potosí 3% (CFB, 2008). Las especies más utilizadas para la forestación y reforestación son: *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus camadulensis*, *Pinus radiata*, *Pinus patula*, *Pinus psedostrobis* y otros. Hay escasas y esporádicas experiencias con especies nativas (Muñoz, 2001).



Figura 2. Plantaciones de Centrolobium tomentosum en el Municipio de Chimoré, trópico de Cochabamba.

2.3 Descripción de las especies forestales estudiadas

2.3.1 Breve descripción de *Schizolobium parahyba*

Familia: Caesalpinaceae (Leguminosae)

Especie: *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake

Nombres comunes: Serebó y sombrerillo (Bolivia); pinho cuiabano (Brasil); tambor (Colombia); pashaco (Ecuador); pashaco y pino chuncho (Perú); copté y plumajillo (Guatemala), gallinazo (Costa Rica); zorra (Hondura).

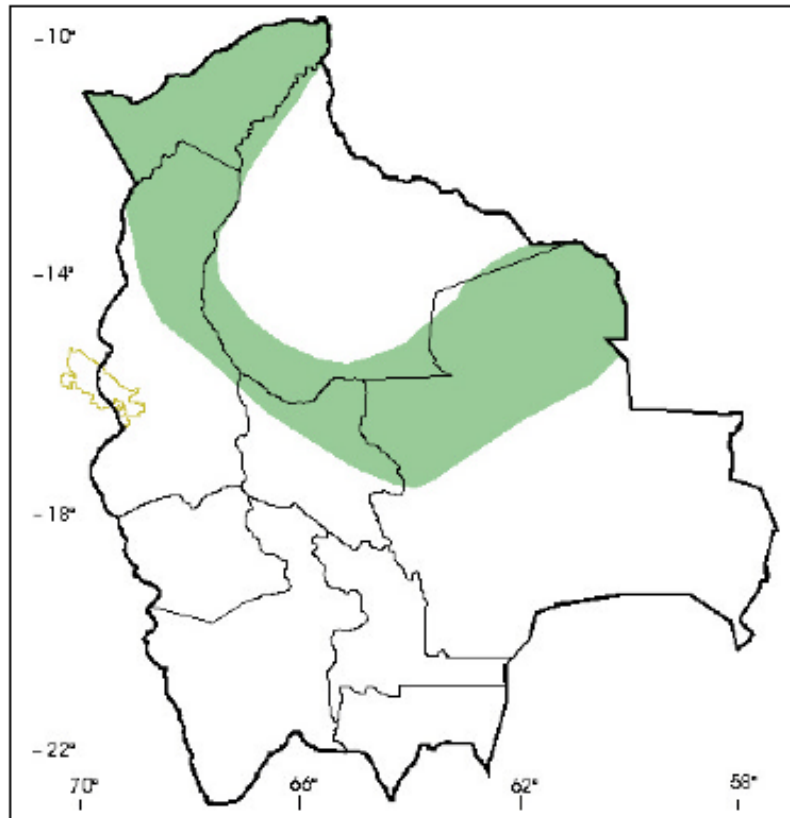


Figura 3. Distribución de *Schizolobium parahyba* en Bolivia (Justiniano et ál., 2001).

Su distribución abarca desde el sur de México a lo largo de América Central, hasta Bolivia (Figura 3), Ecuador, Perú y Brasil (CATIE, 2003). Siendo más abundante en la cuenca del Amazonas (Sandoval, 2006). Es una especie decidua, demandante de luz, característica de

la fase secundaria de los bosques amazónicos y zonas marginales de los bosques húmedos estacionales. Muy común en áreas perturbadas. Se encuentra en una variedad de suelos. Florece de mayo a junio, y fructifica entre julio y septiembre. Los frutos se dispersan por el viento (Mostacedo et ál. 2003). En Colombia, esta especie puede alcanzar 46 m de altura y 80 cm de dap (Maldonado y Escobar, 2000; Sandoval, 2006), mientras que Justiniano et ál. (2001) han estimado que en Bolivia su ciclo de vida puede ser 60 años, con alturas entre 25 - 40 m y fuste cilíndrico y recto (Figura 4) que suele pasar los 100 cm de dap. De hecho, presenta una de las tasas de crecimiento más altas en su hábitat natural distribuido en los bosques húmedos de Santa Cruz, Beni, Pando, Cochabamba y La Paz. Se encuentra en altitudes de 170 a 700 msnm.



Figura 4. Fuste de Schizolobium parahyba en trópico de Cochabamba, Bolivia.

La madera es blanda y se usa para varas, construcciones interiores y de ranchos temporales, juguetes, aviones a escala, artesanías, cajas y muebles. Tiene un enorme potencial para alma de contrachapado y sobre todo es ideal para pulpa de papel y este es el uso que se le da a árboles en plantaciones en Guatemala y en otros países de América del Sur, como Ecuador (CATIE, 2003). Las industrias laminadoras instaladas en Santa Cruz (Bolivia) normalmente se proveen de madera de Serebó de bosques naturales, aunque ya se han realizado las primeras compras de plantaciones.

A pesar de que en Bolivia aún no se ha completado el turno biológico de esta especie en plantaciones, se observa que su manejo silvicultural es aparentemente sencillo. La plantación puede ser realizada con plántones o directamente con semillas sometidas a tratamientos pre-germinativos, las cuales germinan en menos de 15 días si hay buenas condiciones de humedad. El árbol tiene una excelente poda natural por lo que no requiere grandes esfuerzos en ello, excepto las primeras podas de formación (Sandoval, 2006). Aguirre (2002) recomienda aplicar un primer raleo a los 3 años de edad y argumenta que la fertilización y control sanitario pueden ayudar en su buen desarrollo. En Brasil se informa de ataques serios de varios insectos, siendo el principal la broca de la madera (*Acanthoderes jaspidea*), que ataca árboles de crecimiento rápido durante los primeros cuatro años de vida; y en Ecuador, una plantación de 300 ha fracasó debido al ataque de un barrenador, similar al ataque del barrenador de las Meliáceas (CATIE, 2003). Por su parte Vieira (2002), citado por Sandoval (2006) encontró en Brasil que distanciamientos de 4 x 3 m y 4 x 4 m producen mayores crecimientos frente a distanciamientos mayores o menores.

2.3.2 Breve descripción de *Centrolobium tomentosum*

Familia: Fabaceae (Leguminosae)

Especie: *Centrolobium tomentosum* Guill. ex Benth

Nombres comunes: Tejeyeque, tarara amarilla o huasicucho (Bolivia); guayacán (Colombia); arabirá o araruva (Brasil); palalizando (Ecuador); Canary wood, Porcupine wood o Zebra wood (Estados Unidos)

El género *Centrolobium* según Justiniano y Fredericksen (1998), tiene un área de distribución que abarca desde Centro América (Panamá) hasta Sudamérica (Bolivia y Brasil). En Bolivia se encuentra distribuida en forma natural en los departamentos de Santa Cruz, Beni, Pando y Cochabamba (Juchasara, 2006) y se encuentra naturalmente en suelos jóvenes de origen aluvial, que se caracterizan por poseer baja fertilidad, bajo contenido de materia orgánica, pH entre 3.7 y 5.5, baja capacidad de intercambio catiónico, con niveles de saturación de aluminio entre 70% y 80% (Crespo et ál., 1995). El árbol puede alcanzar hasta 35 m de alto y 100 cm de dap (Figura 4), en la edad adulta (Ramalho, 2008). Gurgel (1982) citado por Ramalho (2008) estima que a los 20 años de edad, con una densidad menor a 400 árboles por hectárea, puede alcanzar un incremento anual en volumen de 20 m³/ha promedio.



Figura 5. Fuste de Centrolobium tomentosum en trópico de Cochabamba, Bolivia.

Particularmente en Bolivia es conocido como Tejeyeque o huasicucho, muy cotizado para la fabricación de muebles. Se estima un turno de 20 años para su aprovechamiento (Crespo et ál., 1995). Por su parte, Torres (2005) estimó el incremento medio anual en altura para tres municipios del trópico de Cochabamba, Bolivia (Cuadro 1) y Alba (2007), reporta un incremento medio anual de 2.57 cm en dap y 2.49 m en altura total para plantaciones establecidas en el trópico de Cochabamba.

Cuadro 1. Crecimiento promedio de Centrolobium tomentosum en el trópico de Cochabamba, Bolivia

Municipio	Edad (meses)	Densidad (ár./ha)	Sobrev. %	IMA ht (m/año)
Ivirgarzama	14.8	898	77	1.43
Chimoré	11.8	1190	74	1.47
Villa Tunari	12.1	1100	88	1.03

Fuente: Torrez (2005).

La madera de *Centrolobium tomentosum* puede ser usada en construcción civil y naval, obras externas, hidráulicas, carpintería, muebles finos, torneados, láminas, postes, vigas para puentes, cercas, hélice de pequeños aviones, cabos de herramientas y parquet. Para durmientes, tiene una durabilidad de 11 años (Bastos, 1952; Alba, 2007). Pero también es utilizado como medicina, alimento, extracción de tanino, reforestación con fines paisajísticos y recuperación de suelos degradados (Ramalho, 2008).

2.4 Biomasa forestal

Las plantas verdes fotosintetizan para obtener los elementos nutritivos existentes en el medio, utilizando la energía solar. El resultado de la fotosíntesis es la producción primaria, la cual es incorporada a los tejidos. Este proceso se manifiesta a través del crecimiento y se expresa como peso seco o biomasa (Sattoo, 1982; Mac Donald, 2005).

La biomasa forestal se define como el peso (o estimación equivalente) de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo.

Normalmente es cuantificada en toneladas por hectárea de peso verde o seco (Schlegel et ál., 2002).

La biomasa forestal se ha convertido en un importante elemento de estudio debido a que existe intereses industriales, energéticos y ambientales (juega un rol importante en el ciclo global de carbono) (Merino et ál., 2003). A partir de la biomasa forestal se puede calcular la concentración de carbono en la vegetación (aproximadamente el 50% de la biomasa está formada por carbono) y por consiguiente se pueden hacer estimaciones sobre la cantidad de dióxido de carbono que ingresa a la atmósfera cada vez que se desmonta o se quema un bosque. La biomasa es una variable que sirve también para comparar las características estructurales y funcionales de un ecosistema forestal en un amplio abanico de condiciones (FAO, 1995; Vidal et ál., 2003).

En términos porcentuales, el fuste del árbol concentra la mayor cantidad de biomasa aérea, representando entre 55 y 77% del total: luego están las ramas con 5 a 37%; y por último las hojas y la corteza del fuste entre 1 y 15% y 4 a 16% respectivamente (Gómez, 1976; Madgwick, 1977; Overend, 1978; Pardé, 1980; Schonenberger, 1984; Pedrasa, 1989; Sáez, 1991; Gayoso et ál., 2002). La biomasa de la mayoría de los componentes de los árboles aumenta con la edad del rodal (Gayoso et ál., 2002).

El nivel de producción vegetal está determinado por los factores del crecimiento: clima, suelo, especie forestal y manejo. Una mayor productividad en un sitio generará una mayor producción de biomasa: esta biomasa vegetal contiene cantidades variables de los elementos nutritivos que son utilizados para el crecimiento de los árboles (Muñoz, 2002; Saavedra, 2005). La contribución porcentual de los diferentes componentes (fuste, corteza, ramas, hojas y raíces) en la biomasa total de un árbol varía considerablemente dependiendo de la especie, la edad, el sitio y el tratamiento silvicultural (Pardé, 1980; Gayoso et ál., 2002).

2.5 Métodos para la estimación de la biomasa de árboles sobre el suelo

El cálculo de la biomasa es el primer paso para evaluar la productividad de los ecosistemas y la contribución de los bosques tropicales en el ciclo global del carbono (Parresol, 1999; Ketterings et ál., 2001; Castañeda et ál., 2005). Para ello, existen tres métodos, los cuales se resumen a continuación.

2.5.1 Método tradicional

Este método, se basa en los datos del volumen comercial (a partir de información básica de inventarios), la densidad básica de la madera y el factor de expansión de la biomasa (FEB). Puede aplicarse en los bosques densos, secundarios o maduros (correspondiente a climas húmedos y semiáridos) (Brown, 1997a). La biomasa se estima a través de siguiente ecuación general:

$$BA = VC * D * FEB$$

donde:

BA = Biomasa aérea (t/ha)

VC = Volumen comercial (m³)

D = Densidad básica de la madera (t/m³)

FEB = Factor de expansión de la biomasa (sección 2.10)

2.5.2 Método destructivo

La medición de la cantidad de biomasa aérea en cualquier componente de un ecosistema requiere la aplicación del método destructivo (Brown et ál., 1989). Este método proporciona un valor exacto de la biomasa ya que consiste en destruir los árboles, para calcular su peso seco o biomasa. Adicionalmente, el método permite formular relaciones funcionales entre la biomasa y las variables del rodal de fácil medición como el diámetro a la altura del pecho, altura comercial, altura total y otras (Pardé, 1980; Gayoso et ál., 2002). El inconveniente que presenta es su alto costo en términos de tiempo y recurso económico (Pedrasa, 1989; Brown, 1992; Gayoso et ál., 2002), además de la propia destrucción de los árboles empleados en la medición. El método destructivo es el más preciso (omite errores de estimación) para estimar la cantidad de biomasa aérea (Whittaker y Marks 1975; Pardé 1980; Monroy y Návar, 2004).

2.5.3 Estimación de la biomasa a través de sensores remotos

Las imágenes satelitales registran el comportamiento de la superficie terrestre a través de diferentes regiones del espectro electromagnético, proporcionando una gran cantidad de

datos espacialmente contiguos entre sí y distribuidos a lo largo de extensas áreas geográficas. Estas propiedades les confieren la capacidad de detectar, reconocer e identificar coberturas de suelo, así como medir numerosas propiedades biofísicas y bioquímicas asociadas a ellas, ofreciendo ventajas en comparación con métodos *in situ*, que muchas veces requieren de mediciones en terreno que pueden resultar prohibitivas a amplias escalas, debido a limitantes de accesibilidad, tiempo y recursos (Lillesand et ál., 2004; Aronoff 2005; Eastman 2006; Peña, 2007).

A escala mundial, esta información sirve para conocer el estado y dinámica de los ecosistemas forestales y su interacción con los ciclos globales y el clima. A escala regional o nacional, el conocimiento de la cantidad de biomasa puede servir para realizar mapas o para detectar cambios en las masas forestales (Beaudoin et ál., 1994), al igual que para la realización de los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero que deben ser realizados en el marco del Protocolo de Kioto por los países que lo ratificaron.

Los sensores remotos pueden proveer de datos que permitan responder a las interrogantes e incertidumbres respecto al ciclo dinámico de la biomasa, ya que posibilitan la evaluación frecuente de cambios de cobertura boscosa en grandes extensiones (Brown y Lugo, 1992; Calderón, 1999). Mediante el uso de sensores remotos es posible obtener información de las propiedades del bosque y hasta cierto nivel es posible separar bosque en regeneración de bosques maduros (Foody y Hill, 1996; Foody et ál., 1996; Calderón, 1999).

2.6 Modelos alométricos para la estimación de volumen

El manejo de las plantaciones forestales requiere de la conjunción de aspectos silviculturales y genéticos, que garantizan la máxima productividad posible al menor costo (Moret et ál., 1998). El volumen ha sido y sigue siendo la forma de expresión de la cantidad de madera contenida en los rodales. El volumen de madera contenido en un rodal puede considerarse como la suma de los volúmenes de los árboles en pié comprendidos en él. En consecuencia, una forma de acceder al conocimiento del volumen de madera de un rodal es a través del conocimiento del volumen de sus árboles individuales. Una herramienta para determinar ese volumen son las tablas de volumen. Las tablas de volumen han sido hoy reemplazadas por los modelos de volumen, esto es, por modelos matemáticos capaces de

representar el volumen medio de madera por árbol a partir de las variables independientes, como ser diámetro y altura (Fucaraccio y Staffieri, 1999). Además, la dificultad en la determinación directa del volumen mediante la cubicación de secciones hace conveniente contar con expresiones matemáticas que basadas en una muestra objetivamente seleccionada y cuidadosamente medida, que permite estimar el volumen de los árboles sobre la base de mediciones simples. En general el contenido volumétrico del fuste se considera función de las variables diámetro a la altura del pecho, altura comercial y otros como el factor de forma (Prodan et ál., 1997).

En algunos casos existe la necesidad de transformar las variables. Las transformaciones han sido utilizadas para encontrar datos que satisfagan los supuestos de un modelo paramétrico conveniente. Barlett (1974) citado por Rosas et ál. (2007) señala que el propósito ordinario de la transformación para cualquier tipo de análisis es el de cambiar la escala de mediciones con el objeto de hacerles válidos. Las transformaciones más usadas son: el logaritmo, el antilogaritmo, la raíz cuadrada, las exponenciales y otras. La prueba de Atkinson (InfoStat 2008) permite establecer si es necesario usar la transformación de potencia:

$$Y^* = \frac{Y^\lambda - 1}{\lambda} \quad \lambda = 1 - \gamma$$

donde:

Y = Variable dependiente.

γ = Valor estimado por Infostat (2008).

La prueba de Atkinson permite contrastar la hipótesis $\gamma=0$. Si la hipótesis no se rechaza implica que $\lambda=1$ y por lo tanto no es necesario aplicar la transformación de potencia a los datos. Si la prueba resulta significativa la transformación de potencia es aconsejable y el exponente de la transformación está dado por $1-\gamma$. Esta prueba no se puede realizar si la variable independiente tiene valores cero (Balzarini et ál., 2008).

2.7 Modelos alométricos para la estimación de la biomasa

La medición de la cantidad de biomasa aérea en cualquier componente de un ecosistema requiere un análisis destructivo directo (Brown et ál., 1989; Acosta et ál., 2002) o estimaciones indirectas del material vegetal para hacer las inferencias respectivas; el segundo caso es más práctico cuando se desea estimar la biomasa aérea de los árboles. Para ello, se debe contar con modelos que estimen la biomasa total con base en el tamaño y dimensiones de los árboles; es decir, modelos matemáticos basados en las relaciones alométricas que ocurren entre los órganos de un individuo (Huxley, 1932; Acosta et ál., 2002). Estos modelos tienen mucha aplicación en el campo forestal, porque presentan mucha flexibilidad en su uso; las variables más usadas son: el diámetro a la altura del pecho (dap), diámetro a la altura del tocón (dat), altura comercial (hc), altura total (ht) y combinaciones de ellas (Prado et ál., 1987; Garcinuño, 1995; Gayoso et ál., 2002).

En la mayoría de los trabajos realizados en zonas tropicales se ha encontrado que la variable independiente que mejor explica la biomasa de un árbol es el diámetro a la altura del pecho (Overman et ál., 1994; Regina, 2000), al igual que en zonas templadas (Chave et ál., 2001). Muchos autores lo consideran por ser de fácil medición y además lo utilizan multiplicado por otras variables o expresando bajo algún tipo de transformación. En general, al graficar una cantidad de datos representativos de diámetro a la altura del pecho y biomasa de árboles se presenta una tendencia no lineal y la nube de puntos muestra un problema de heterocedasticidad reflejada en el incremento de la varianza con el aumento del diámetro (Overman et ál., 1990; Álvarez, 1993; Overman et ál., 1994).

En la parte izquierda de la Figura 6 se ilustra la tendencia heterocedástica de los datos de biomasa, sin transformación logarítmica, con el incremento de la variable dap. La mayoría de los trabajos reportados utilizan el método inicialmente propuesto por Kittredge (1944). Éste consiste en que la biomasa de algún componente o el árbol completo se relaciona con variables del tamaño del árbol en una regresión lineal bajo las escalas logarítmicas.

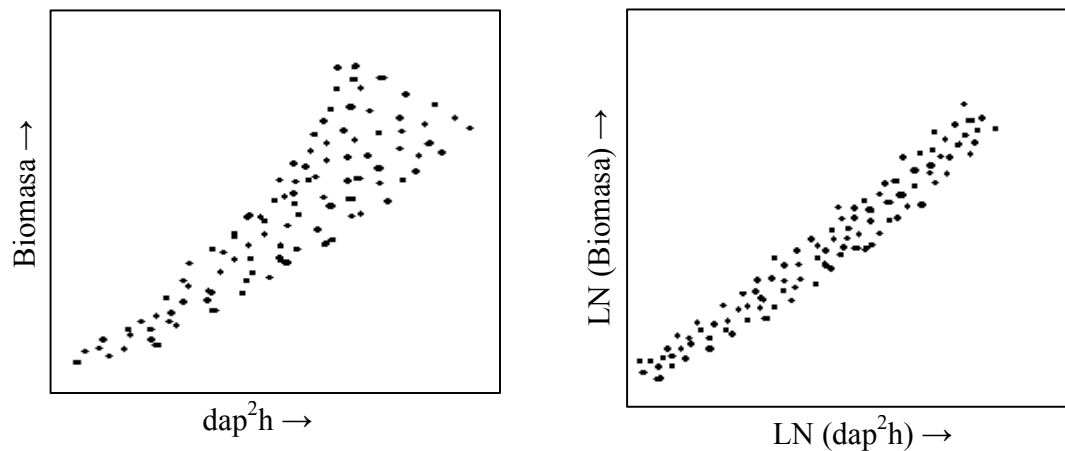


Figura 6. La biomasa en función del dap y la altura sin transformación y con transformación logarítmica. Fuente: Bell et ál. (1984) citado por UNC (2003).

El lado derecho de la Figura 6 ilustra esta situación. Ésta transformación simplifica los cálculos, pues permite utilizar análisis de regresión lineal y además, incrementa la validación estadística del análisis al homogenizar la varianza sobre el rango de los datos. Sin embargo, la transformación introduce un sesgo sistemático en los cálculos (Sprugel, 1983), obteniéndose una sobreestimación del valor de la biomasa calculado. Teóricamente esta desviación se produce al utilizar las sucesivas transformaciones logaritmo – antilogaritmo de los datos. Algunos trabajos comentan que esta desviación es muy escasa y poco significativa (Pastor y Bockbeim, 1981; Turner y Long, 1975; Castro et ál., 1995). A pesar de ello, se han propuesto factores de corrección a fin de minimizar las diferencias detectadas (Sprugel, 1983). Sin embargo, en la actualidad sigue siendo práctica habitual la obtención de modelos alométricos mediante transformación logaritmo – antilogaritmo, sin correcciones posteriores.

Uno de los modelos más utilizados en los estudios de biomasa para relacionar la biomasa de un árbol o la biomasa de uno de sus componentes, con alguna variable de fácil medición es el modelo alométrico (Overman et ál., 1994; Enquist et ál., 1998). La confiabilidad de las estimaciones actuales de la cantidad y la dinámica del carbono en el bosque o ecosistema puede ser mejorada aplicando conocimiento existente de la alometría de árboles que está disponible bajo la forma de ecuaciones de biomasa (Jenkins et ál., 2003; Zianis y Mencuccini, 2003; Llehtonen et ál., 2004; Zianis et ál., 2005).

La alometría estudia los patrones de crecimiento, es decir, la proporcionalidad entre razones específicas o relativas de crecimiento (Batscheler, 1978; UNC, 2003). Esta relación se conoce como ley alométrica. Así, la hipótesis de alometría sugiere que existe proporcionalidad entre las tasas de crecimiento relativas de dos variables de tamaño que pueden ser el peso de diferentes secciones o parte de un organismo o una de sus dimensiones (Broad, 1998). Estos cambios en tamaño satisfacen una ecuación o función alométrica. La curva de crecimiento alométrico ha tenido aplicación para muchos organismos, ya que la razón entre incrementos en estructuras de diferente tamaño es aproximadamente constante, mostrando grandes incrementos en una de las variables con respecto a otra sobre la escala logarítmica (Skal, 1969; UNC, 2003). Comúnmente la ecuación se expresa mediante el modelo alométrico linealizado:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 LN(X) + \varepsilon_i$$

Donde Y es la biomasa, β_0 y β_1 los parámetros estimados, X es la variable independiente y ε_i es el término de error aleatorio.

Según la literatura hay una clara tendencia a utilizar funciones logarítmicas para estimación de la biomasa, sin embargo el uso de estas funciones es recomendable cuando se tiene datos muy dispersos (Garcinuño, 1995; Gayoso et ál., 2002). Por su parte, las funciones exponenciales entregan estimaciones de biomasa, similares a las linealizadas pero presentan errores de estimación levemente superiores. Sin embargo, estos errores pueden ser corregidos al realizar una transformación de variables a ambos lados de la ecuación, con lo que se logra obtener estructuras de error más homogéneas sin alterar la forma del modelo (Gujarati, 1981; Zar, 1999; Gayoso et ál., 2002).

2.8 Evaluación de los modelos alométricos

El objetivo de la evaluación de modelos es seleccionar aquellos que presenten el mejor balance entre la capacidad de ajuste de los datos y su complejidad. Modelos con un mayor número de parámetros tienden a ajustar mejor una base de datos, no obstante tienden a ser más inestables y a modelar la variabilidad de esos datos más que su tendencia (Posada et ál., 2007). Adicionalmente, el mayor número de parámetros implicará mediciones adicionales de una de las variables adicionadas al modelo para el cálculo del modelo.

Los modelos pueden ser evaluados de acuerdo con los siguientes criterios: El coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado), el Error Cuadrático Medio de Predicción (ECMP), el Criterio de Información Akaike (AIC, por sus siglas en inglés) y el Criterio de Información Bayesiano (BIC, por siglas en inglés).

Coefficiente de determinación. Este coeficiente se interpreta como la proporción de la variabilidad total en Y explicable por la variación de la variable independiente o la proporción de la variabilidad total explicada por el modelo (Di Rienzo et ál., 2001), y puede obtenerse mediante la siguiente fórmula:

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT}$$

donde:

R^2 = Coeficiente de determinación.

SCR = Suma de cuadrados de regresión.

SCT = Suma de cuadrados total.

El **coeficiente de determinación ajustado** (R^2 Ajustado) se obtiene a partir de la expresión:

$$R_{Aj}^2 = 1 - (1 - R^2) \left[\frac{n - 1}{n - p} \right]$$

donde:

R_{Aj}^2 = Coeficiente de determinación ajustado.

n = Es el número total de observaciones.

p = Es el número total de parámetros del modelo ajustado.

El **Error Cuadrático Medio de Predicción** (ECMP) los modelos seleccionados por su mayor capacidad de ajuste son aquellos que expresan el menor valor en este criterio y puede calcularse a partir de la siguiente ecuación (Ferriols et ál., 1995):

$$ECMP = \sum \frac{(CP - CE)^2}{N}$$

donde:

CP = Concentración predicha.

CE = Concentración experimental.

N = El número total de determinaciones.

El **Criterio de Información Akaike** (AIC) (Mcbratney y Pringle 1999; Moret et ál. 2007), puede obtenerse mediante la siguiente fórmula:

$$AIC = n * LN \left(\sum_{i=1}^n (observado - predicho)^2 \right) * 2p$$

donde:

n = Valor observado para cada árbol.

p = Número de parámetros del modelo.

El **Criterio de Información Bayesiano** (BIC), puede obtenerse a través de la siguiente fórmula:

$$BIC = nLog(1 - R_k^2) + p_k Log$$

donde:

n = Número de observaciones.

R_k² = Coeficiente de determinación.

p_k = Número de regresoras presente en el modelo.

AIC y BIC, son criterios que se utilizan en la selección de modelos para elegir el mejor entre un conjunto de modelos admisibles. Un modelo es mejor que otro si tiene un valor AIC o

BIC menor. El AIC se basa en la distancia de Kullback-Leibler en la teoría de la información y el BIC se basa en una verosimilitud integrada en la teoría bayesiana. Si no aumenta la complejidad del modelo verdadero con el tamaño del conjunto de datos, es preferible el criterio BIC, y en caso contrario el AIC (Burnham y Anderson, 1998; FAO, 2004).

2.9 Densidad básica de la madera y contenido de carbono en la biomasa

La biomasa de los árboles puede estimarse también por un método distinto al empleo de modelos alométricos de biomasa. Generalmente, a través de inventario se cuenta con el volumen comercial o total. Para llevar este volumen a biomasa es necesario contar con la densidad básica de la madera, la cual permite transformar los volúmenes húmedos en biomasa.

Dentro de las propiedades físicas de la madera, la densidad básica de la madera es una de las más importantes, ya que determina el valor y la utilidad de la misma, y está fuertemente correlacionada con otras propiedades tales como la resistencia mecánica, la rigidez, la conductividad térmica y el calor específico (Tuset y Durán, 1974; Davel et ál., 2005).

La densidad básica de la madera varía en función del tipo de bosque, de las condiciones de crecimiento, de la densidad de rodal y del clima (Kramer, 1982; Brown, 1997; Lowe et ál., 2000; Koehl, 2000; IPCC, 2003). Además, posee un patrón de variación con la edad y la altura del árbol, de tal manera que durante los primeros años el árbol produce madera con anillos de crecimiento anchos, donde hay una mayor proporción de madera temprana de baja densidad. Respecto a la altura, la densidad es mayor en la base y va disminuyendo hacia la copa. (Megraw, 1985; Pereyra y Gemid, 2002).

En general, se acepta que el contenido de carbono corresponde al 50% de la biomasa (Slijepcevic, 2001). El IPCC (1996) señala también que el rango más citado para el contenido de carbono en la biomasa es de 43 a 58%. Sin embargo, diferentes estudios denotan la variabilidad del contenido de carbono según especie y tejido del árbol (Francis, 2000). Cubero y Rojas (1999) señalan que el contenido de carbono en la biomasa arbórea se ve influenciado por la calidad del sitio y edad de las plantaciones, obteniendo contenidos de carbono entre 32 y 40% para plantaciones de *Gmelina arborea*, 32 a 36% para *Tectona grandis* y 33 a 36% para *Bombacopsis quinata*.

2.10 Factor de expansión de la biomasa

Existe una amplia experiencia en el campo forestal sobre las técnicas para estimar el volumen (total y comercial) y el crecimiento de un rodal a lo largo del tiempo. A partir de ellas se ha generado mucha información que constituye una base muy útil para generar estimaciones de la capacidad de fijación de carbono en un rodal. Para la transformación de ese volumen de fustes estimado mediante inventarios forestales en valores de biomasa total son necesarios coeficientes técnicos que permitan la relación porcentual entre ambas medidas. Estos coeficientes son los denominados factores de expansión de la biomasa (FEB) (Loguercio y Defossé, 2001).

FEB es el factor de multiplicación que aumenta la madera en pie o el volumen comercial, para tener en cuenta componentes de biomasa no medidos, como ramas, follajes y árboles no comerciales (IPCC, 2003). El factor de expansión de biomasa se define como el cociente entre la biomasa aérea total y la biomasa de los fustes (Dauber et ál., 2001), y se expresa de la siguiente manera:

$$FEB = \frac{BT}{BF}$$

donde:

FEB = Factor de expansión de la biomasa.

BT = Biomasa total (kg).

BF = Biomasa de fuste (kg).

El factor de expansión de la biomasa, varía mucho entre especies y condiciones particulares de los ecosistemas forestales. El valor más empleado es 1.6 (Dixon, 1995; Andrade e Ibrahim, 2003); sin embargo, en sistemas agroforestales, se pueden encontrar valores promedios de 2.2 con un rango de 1.9 a 2.4 (Andrade e Ibrahim, 2003). Ruiz (2002) encontró valores promedio de FEB de 1.6 para siete especies arbóreas dispersas en pasturas de Matiguás, Nicaragua (*Cassia grandis*, *Platymiscium pleiostachyum*, *Pithecellobium saman*, *Guazuma ulmifolia*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Cordia alliodora* y *Tabebuia rosea*).

Según Brown (1997a), para bosques donde la biomasa total de fuste sea mayor o igual a 190 t/ha el valor de FEB es de 1.74 y para menores a 190 t/ha el valor de FEB se calcula a partir de la siguiente ecuación: $FEB = EXP(3.213 - 0.506 * LN(BF))$

$$FEB = EXP^{(3.213 - 0.506 * LN(BF))}$$

donde

FEB = Factor de expansión de biomasa.

BF = Biomasa de fuste (t/ha).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del área de estudio

El presente estudio se realizó en los Municipios de Villa Tunari, Chimoré, Puerto Villarroel y Entre Ríos (trópico de Cochabamba), del Departamento de Cochabamba, Bolivia (Figura 7). Se encuentran ubicados entre 16° 39' y 17° 25' de latitud sur y 64° 14' y 65° 44' longitud oeste (Ferrufino y Meneses, 2003).

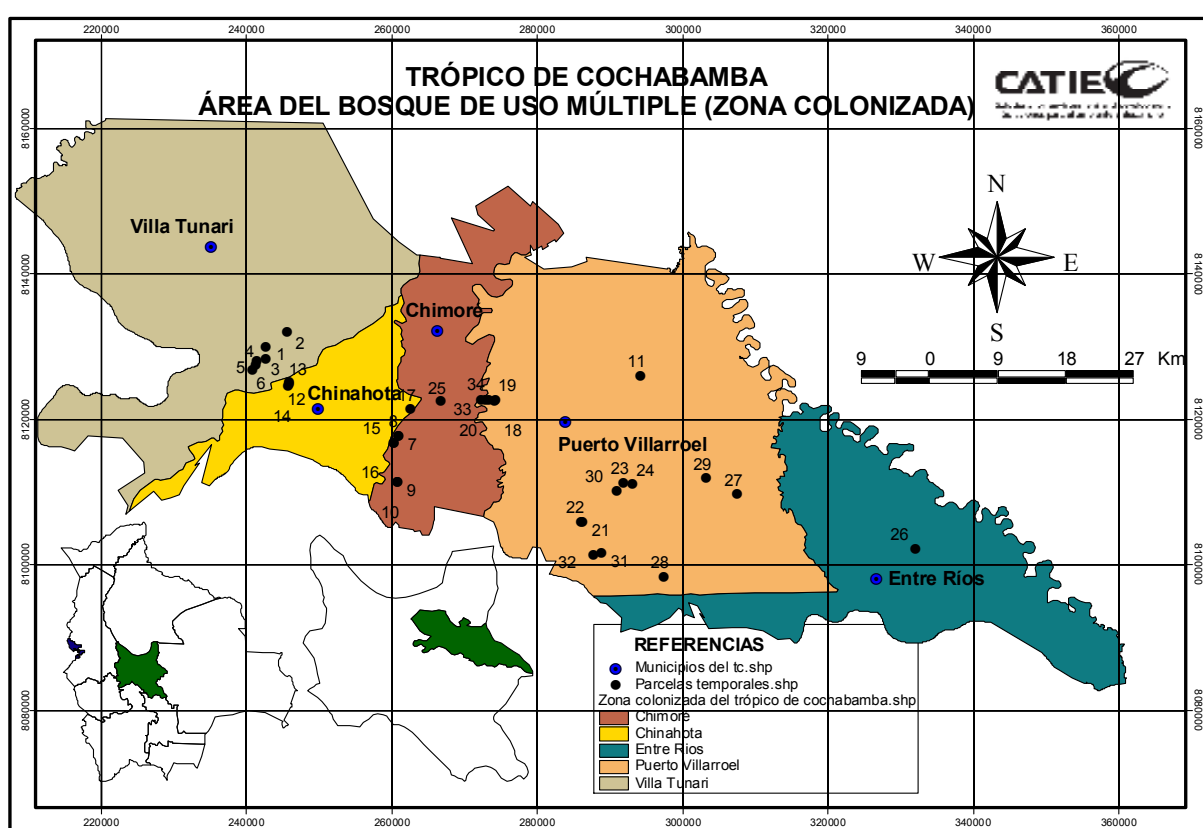


Figura 7. Localización del área de estudio, trópico de Cochabamba, Bolivia.

3.2 Características del área de estudio

El área del trópico de Cochabamba es de aproximadamente 37930 km² (la zona colonizada de aproximadamente 4079.16 km², Figura 7) de la cual el 83% corresponde a bosques y representa más del 50% de la superficie del departamento. La zona presenta una variación altitudinal entre 200 y 1200 msnm, con una humedad relativa de 75 a 95%, el rango de temperatura media anual es de 25 a 28 °C. El rango de precipitación media anual es de 3000

a 6000 mm; el 80% de la precipitación anual ocurre entre los meses de octubre y abril (Ferrufino y Meneses, 2003). Los suelos son de origen aluvial y por lo general tiene buenas características físicas, pero presentan deficiencias de nutrientes debido a la composición de los sedimentos y la alta pluviosidad provocando la acidez del suelo y toxicidad de aluminio para muchos cultivos. A esto se debe sumar problemas físicos de drenaje que se presentan en las tierras bajas. En consecuencia, la mayor parte de los suelos muestran limitaciones serias para la producción agropecuaria y han sido clasificados como tierras de vocación forestal o agroforestal; en general se puede definir como pobres en nutrientes, alta acidez con pH de 4 a 6 (FAO, 1996; Alba, 2007).

3.3 Instrumentos y materiales

Para la presente investigación se utilizarán los siguientes instrumentos y materiales:

- ✓ Sistema de posicionamiento global (GPS)
- ✓ Motosierra
- ✓ Cinta métrica de 50 m.
- ✓ Cinta diamétrica
- ✓ Dinamómetros PESOLA (100 kg y 500 g)
- ✓ Tijeras podadoras
- ✓ Sierra (Cola de zorro)
- ✓ Machete
- ✓ Hacha
- ✓ Bolsas de papel para muestras
- ✓ Marcadores permanentes
- ✓ Pintura aerosol fosforescente
- ✓ Horno
- ✓ Reactivos (Cromato de potasio, ácido sulfúrico y sulfato ferroso)
- ✓ Formularios de campo

3.4 Selección de las especies, los rodales y las parcelas temporales.

A partir de la información y mapeo de las plantaciones forestales, desarrollados por la Fundación Jatun Sacha, el Centro Técnico Forestal (CETEFOR) y el proyecto de

Aprovechamiento integral y sostenible de recursos forestales en el trópico de Cochabamba, se elaboró una lista de las especies forestales nativas más utilizadas en el trópico de Cochabamba para la reforestación. Luego, se analizó su importancia comercial, la distribución en los diferentes Municipios y las edades de los rodales existentes.

Las especies nativas seleccionadas para el estudio fueron: *Centrolobium tomentosum* (Tejeyeque) y *Schizolobium parahyba* (Serebó). Ulteriormente se ubicaron los rodales con incremento medio anual próximos a 2.57 cm/año en dap para *Centrolobium tomentosum* (Alba, 2007) y 3.88 cm/año en dap para *Schizolobium parahyba* (Torrez, 2005). Las parcelas se instalaron en el centro del rodal para evitar efectos de borde; se establecieron un total de 34 parcelas (18 parcelas en rodales de *Centrolobium tomentosum* y 16 parcelas en rodales de *Schizolobium parahyba*). Para una correcta ubicación de estas parcelas en terreno, se utilizó un equipo de sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés). Las parcelas temporales instaladas fueron circulares y con una superficie de 200 m² (Figura 8). En cada una de las parcelas temporales se registró la Fecha de medición de la parcela, el número de parcela, el municipio, la comunidad, el nombre del propietario, el tipo de plantación, la especie, el distanciamiento, la edad de la plantación y el punto central de la parcela con GPS (Anexo 1) y se hizo un inventario de los árboles iniciando por el radio norte de la parcela, en la cual se midieron el dap (cm) de todos los árboles (con dap \geq 5 cm existentes en la parcela).

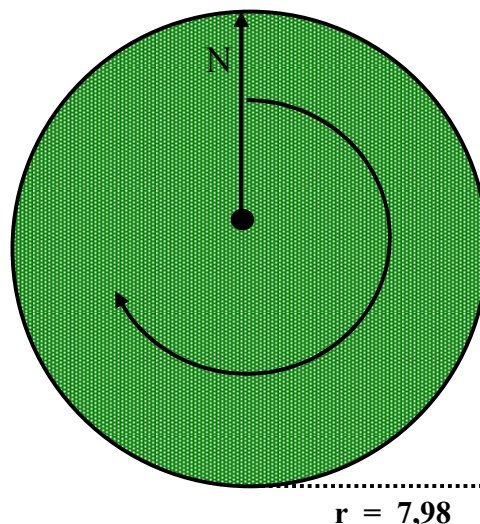


Figura 8. Esquema de la parcela temporal.

3.5 Selección de los árboles para el muestreo destructivo

A partir de los inventarios de las parcelas se realizaron análisis de clases diamétricas con una amplitud de 5 cm de dap (Figuras 9 y 10) y diagramas de dispersión de dap vs. Edad (Figuras 11 y 12). Esta información se usó para la selección de árboles, con la finalidad de obtener una muestra que incluya individuos en las diferentes clases diamétricas y edades.

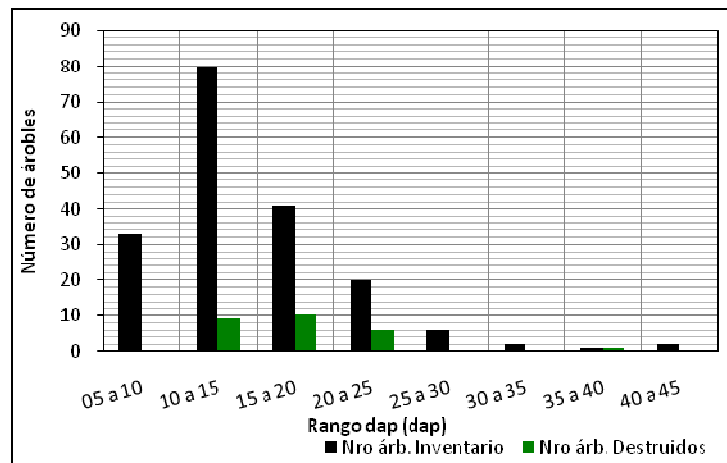


Figura 9. Distribución diamétrica de los árboles de *Centrolobium tomentosum* muestreados.

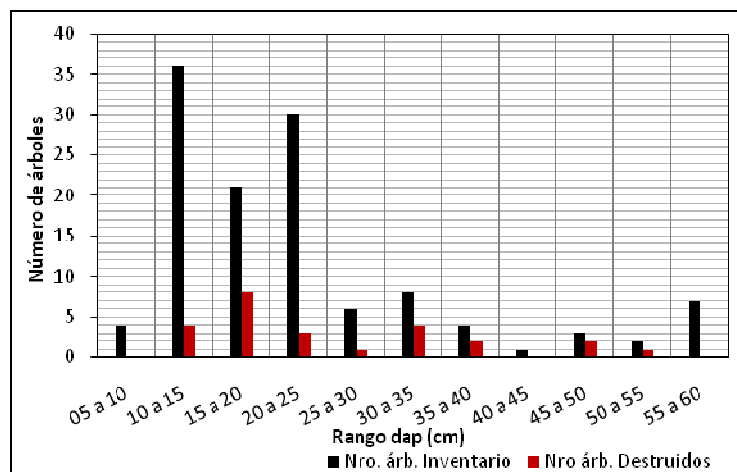


Figura 10. Distribución diamétrica de los árboles de *Schizolobium parahyba* muestreados.

Según Calderón et ál. (2003) el número de árboles para el muestreo destructivo normalmente varía entre 20 a 40. En este estudio se utilizó un total de 51 árboles (26 y 25 árboles para la especie *Centrolobium tomentosum* y *Schizolobium parahyba* respectivamente).



Figura 11. Diagrama de dispersión del dap versus edad para *Centrolobium tomentosum*.

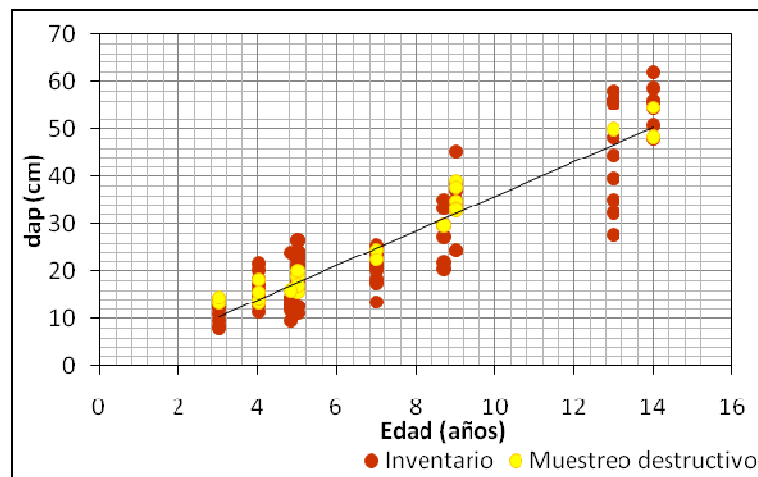


Figura 12. Diagrama de dispersión del dap versus edad para *Schizolobium parahyba*.

3.6 Muestreo en campo

En cada árbol seleccionado para el muestreo destructivo se midió el dap del árbol en pie, luego se procedió a apear el árbol y registrar la altura comercial o el largo útil del fuste (suma de todas las trozas obtenidas de cada árbol apeado hasta la primera ramificación) y la altura total (incluyendo el tocón). Ulteriormente se dividió el árbol en los siguientes componentes:

El fuste se subdividió en fracciones de un metro de largo, luego fueron medidos los diámetros menor y mayor de cada fracción con corteza. Pero el tocón con gambas se calculó directamente el volumen a través del método de Arquímedes.

La copa se subdividió en ramas y follaje (Figura 13). En las ramas con formas regulares fueron medidos el largo, el diámetro de la sección mayor y el diámetro de la sección menor. Sin embargo, en el caso de las ramas con formas irregulares se calculó directamente el volumen con el método de desplazamiento de agua (método de Arquímedes). Luego, se registró el peso húmedo total del follaje, utilizando una balanza mecánica con una precisión de 0.5 kg.



Figura 13. Componentes del árbol para Centrolobium tomentosum.

De cada árbol apeado se obtuvieron, cinco muestras de madera; Tres de fuste (una muestra de la base del fuste, a la mitad del fuste comercial y la primera ramificación), y dos muestras de ramas al azar. También se obtuvieron tres muestras de follaje (15 g aproximadamente) para su análisis en laboratorio. Luego, se determinó el peso húmedo de las muestras (hojas) en una balanza digital con una precisión de 0.01 g.

3.7 Procesamiento de las muestras

Las muestras extraídas, tanto de la madera como del follaje, fueron llevadas a laboratorio donde se les aplicaron los siguientes procedimientos para la determinación de contenido de humedad, densidad básica de la madera y contenido de carbono.

Método de determinación de contenido de humedad. Todas las muestras (de madera y follaje) fueron secadas en el horno a una temperatura de 103 ± 2 °C hasta peso constante (laboratorio de la Escuela de Ciencias Forestales de la Universidad Mayor de San Simón), luego se registró el peso seco con una balanza de precisión (Figura 14). El contenido de humedad se calculó empleando la siguiente ecuación:

$$CH = \left(\frac{Phm - Psm}{Psm} \right) * 100$$

donde:

CH = Contenido de humedad (%).

Phm = Peso húmedo de las muestras (g).

Psm = Peso seco de las muestras (g).



Figura 14. Horno y balanza de precisión para la determinación de contenido de humedad.

Método de determinación de densidad básica. Para realizar este trabajo se utilizaron probetas de sección cuadrada de 25 mm por lado y 100 mm de longitud (Diaz, 2005). Las probetas fueron medidas con un calibrador digital (Figura 15). La Norma Chilena 968 Of 86 establece que: “para estudios preliminares que permitan obtener un promedio de las propiedades físicas y mecánicas, se seleccionarán como mínimo 5 árboles, con 10 probetas por ensayo, para trabajar con una seguridad estadísticas del 95%” (Labartê, 2005). Sin embargo, para el presente estudio se obtuvieron 130 y 125 probetas para la especie *Centrolobium tomentosum* y *Schizolobium parahyba* respectivamente, cinco probetas por árbol (tres del fuste y dos de las ramas). A efectos de tener seguridad de que no hubo pérdida de humedad en el material a ensayar, desde el momento de apeo y llegada al laboratorio, todo el material antes de determinar el volumen se sumergió en agua hasta saturación. Luego, fueron secados en el horno hasta peso constante, a una temperatura de 103 ± 2 °C. Ulteriormente se registró el peso seco de las muestras. La densidad básica de la madera se determinó a través de la siguiente ecuación (Davel et ál., 2005):

$$DB = \frac{Psh}{Vv}$$

donde:

DB = Densidad básica de la madera (g/cm^3).

Psh = Peso de la madera seca al horno (g).

Vv = Volumen de la madera en estado verde (cm^3).



Figura 15. Calibrador digital para medir las dimensiones de la probeta.

Método de determinación de contenido de carbono. El carbono presente en la biomasa de los árboles se determinó, en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias de la Universidad Mayor de San Simón, utilizando la metodología de combustión húmeda descrita por Walkley-Black. El principio de este método consiste en la oxidación del carbono orgánico por medio del ácido crómico caliente. A la muestra se le da una cantidad de calor, en un baño con ácido crómico. El ácido crómico no utilizado en la oxidación del carbono orgánico se determina mediante titulación con sulfato ferroso de amonio (Chapman, 1973; Ruiz, 2002).

Procedimiento para el cálculo de la biomasa aérea. La biomasa de los diferentes componentes sobre el suelo (fuste, ramas y follaje) se determinó a través de la siguiente ecuación:

$$BT = BF + BR + BH$$

donde:

BT = Biomasa total (Kg).

BF = Biomasa del fuste (Kg).

BR = Biomasa de ramas (Kg).

BH = Biomasa de hojas (Kg).

La biomasa del fuste se determinó a través de la siguiente ecuación:

$$BF = VF * DB$$

donde:

BF = Biomasa de fuste (g).

VF = Volumen de fuste (cm³).

DB = Densidad básica de la madera (g/cm³).

Los valores de biomasa en gramos se dividieron entre 1000 para obtener el equivalente en kilogramos. El volumen se obtuvo con el método de cubicación de *Smalian* y el volumen de los tocones con gambas se determinó a través del método de Arquímedes o desplazamiento de agua. Se utilizó la siguiente ecuación para calcular el volumen de fuste:

$$VF = \frac{\left[\frac{\pi}{4} * (D)^2 + \frac{\pi}{4} * (d)^2 \right]}{2} * L$$

donde:

VF = Volumen del fuste (cm³).

π = Pi (3.1416).

D = Diámetro de la sección mayor con corteza (cm).

d = Diámetro de la sección menor con corteza (cm).

L = Largo de la troza (cm).

La biomasa de la copa se subdividió en ramas y hojas. El volumen de las ramas con formas regulares se calculó con el método de cubicación de *Smalian* y las ramas irregulares con el método de Arquímedes o desplazamiento de agua.

Según Schlegel et ál. (2001), la ecuación para determinar la biomasa de las hojas es:

$$BH = \frac{Phth}{1 + \frac{CH}{100}}$$

donde:

BH = Biomasa de la hojas (g).

Phth = Peso húmedo total de las hojas (g).

CH = Contenido de humedad de las hojas (%).

Los valores de biomasa en gramos se dividieron entre 1000000 para obtener en toneladas.

Factores de expansión de la biomasa. El factor de expansión de biomasa se calculó mediante la siguiente ecuación (Dauber et ál., 2001):

$$FEB = \frac{BT}{BF}$$

donde:

FEB = Factor de expansión de la biomasa.

BT = Biomasa total (Kg).

BF = Biomasa de fuste (Kg).

3.8 Análisis de datos

Los datos de la densidad básica de la madera y carbono orgánico presente en la biomasa; fueron examinados para determinar su distribución y variabilidad (medidas de posición y medidas de dispersión). Entre otros análisis se realizaron: análisis de varianza y la prueba de comparación de medias LSD de Fisher. Los datos fueron analizados con el software estadístico InfoStat.

3.8.1 Ajuste de modelos de volumen y biomasa aérea

Los modelos de volumen de los árboles por especie permiten calcular el volumen en función de variables explicativas medidas en el árbol, como el diámetro a la altura del pecho y el largo comercial.

A partir del dap, altura comercial, altura total y la biomasa aérea, se ensayaron los modelos alométricos para la estimación de la biomasa más utilizados en estudios similares (Cuadro 2), entre los cuales se utilizaron modelos con una variable (dap) y dos variables (dap – hc y dap – ht). Se hicieron transformaciones de potencia a través de la prueba de Atkinson y logaritmo natural (LN), previo análisis de los datos. Para el análisis se utilizó el programa estadístico InfoStat.

La selección de los mejores modelos ajustados fue dividida en dos etapas: La primera etapa consideró la correlación entre las variables (Coeficiente de correlación Pearson) y la existencia de coeficientes de correlación no significativos fue causa para la no inclusión de la variable en el modelo. La segunda etapa de selección de modelos fue el cumplimiento de los supuestos y la comparación de los estadígrafos: El coeficiente de determinación (R^2) coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado), el Error Cuadrático Medio de Predicción (ECMP), el Criterio de Información Akaike (AIC por sus siglas en inglés) y el Criterio de Información Bayesiano (BIC por sus siglas en inglés). En todas las pruebas de hipótesis se consideró un nivel de significancia de 0.05.

Cuadro 2. Modelos alométricos ajustados para la estimación de la biomasa aérea y volumen

Nro	Modelos alométricos	Fuente
1	$BA = \beta_0 + \beta_1 * dap$	Suárez et ál. (2004)
2	$BA = \beta_0 + \beta_1 * dap^2$	Avendaño (2008)
3	$BA = \beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 * dap^2$	Segura (1999)
4	$BA = (\beta_0 + \beta_1 * dap)^2$	Gayoso et ál. (2002)
5	$BA = (\beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 * hc)^2$	Ferrere et ál. (2008)
6	$BA = (\beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 * hc^2)^2$	Muukkonen y Makipaa (2006)
7	$BA = \beta_0 + \beta_1 * dap^2 + \beta_2 * h$	Montero y montagnini (2005)
8	$BA = \beta_0 + \beta_1 * dap^2 * h$	Monroy y Návar (2004)
9	$BA = \beta_0 + \beta_1 * LN(dap)$	Chave et ál. (2001)
10	$BA = \beta_0 + \beta_1 * LN(dap) + \beta_2 * LN(h)$	Montero y montagnini (2005)
11	$BA = EXP(\beta_0 + \beta_1 * dap)$	Gayoso et ál. (2002)
12	$BA = EXP(\beta_0 + \beta_1 * LN(dap))$	Gayoso et ál. (2002)
13	$BA = EXP(\beta_0 + \beta_1 * LN(dap) + \beta_2 * LN(h))$	Gayoso et ál. (2002)

BAT = Biomasa aérea total (Kg); dap = Diámetro a la altura del pecho (cm); hc = Altura comercial (m); β_0 , β_1 y β_2 = Parámetros estimados.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 3 se presenta los valores mínimos y máximos de las variables utilizadas para determinar la densidad básica de la madera, contenido de carbono en la biomasa, la biomasa en los componentes del árbol, factor de expansión de biomasa y modelos alométricos de volumen comercial y biomasa aérea de las especies estudiadas.

Cuadro 3. *Ámbito de validez de los datos para las especies estudiadas*

Especie	n	Edad (año)	dap (cm)	hc (m)	ba (kg/árbol)	vc (m ³ /árbol)
<i>Centrolobium tomentosum</i>	26	3 – 13	10.1 – 36.6	4.2 – 12.0	214.15	0.25
<i>Schizolobium parahyba</i>	25	3 - 14	13.4 – 54.4	5.6 – 17.1	551.62	0.86

4.1 Densidades básicas de la madera de las especies estudiadas

El promedio de densidad básica de la madera (Cuadro 4) para las especies estudiadas, con muestras del fuste y las ramas, fue de 0.46 g/cm³ y 0.36 g/cm³ para *Centrolobium tomentosum* (árboles con dap entre 10.1 y 36.6 cm) y a *Schizolobium parahyba* (árboles con dap entre 13.4 y 54.4 cm) respectivamente. Sin embargo, Gutiérrez y Silva (2002), en un estudio realizado para especies maderables de Bolivia, reportan valores altos para estas especies; 0.58 g/cm³ para *Centrolobium tomentosum* y 0.40 g/cm³ para *Schizolobium parahyba*. Por su parte Chave et ál. (2006) determinaron que la especie *Schizolobium parahyba* tiene una densidad básica de 0.43 g/cm³. Mientras que Silva et ál. (1983) citados por Crespo et ál. (1995) estiman que la densidad básica de *Centrolobium tomentosum* varía entre 0.55 a 0.58 g/cm³.

Cuadro 4. *Estadística descriptiva para la de densidad básica de la madera de las especies estudiadas*

Variable	n	PP (g/cm ³)	D.E.	Var (n-1)	E.E.	CV	L.I.	L.S.
<i>Centrolobium tomentosum</i>	130	0.464	0.033	0.001	0.007	7.117	0.412	0.521
<i>Schizolobium parahyba</i>	125	0.360	0.090	0.008	0.018	24.916	0.229	0.574

PP = Promedio ponderado; D.E. = Desviación estándar; Var (n-1) = Varianza; E.E. = Error estándar; Coeficiente de variación; L.I. = Límite inferior y L.S. = Límite superior.

Por tanto, los resultados de la presente investigación mostraron valores inferiores a los reportes por otros autores (anteriormente mencionados). Esta diferencia se puede deber a que las muestras obtenidas para esta investigación incluyen individuos con menores edades (hasta tres años) y las ramas. Según Megraw (1985), citado por Pereyra y Gemid (2002), la densidad posee un patrón de variación con la edad y la altura del árbol, de tal manera que durante los primeros años el árbol produce madera con anillos de crecimiento anchos, donde hay una mayor proporción de madera temprana de baja densidad. Respecto a la altura, la densidad es mayor en la base y va disminuyendo hacia la copa.

Por tanto, a través de análisis de varianza y comparación de medias (LSD Fisher) para los componentes y edades (Anexo 6), se determinó que existe diferencia significativa para la densidad básica de la madera entre los componentes del árbol y las edades (Cuadros 5 y 6), siendo mayor la densidad básica en edades superiores a seis años, para ambas especies (0.46 g/cm³ para *Centrolobium tomentosum* y 0.42 g/cm³ para *Schizolobium parahyba*). También se determinó la densidad básica para fines comerciales (madera), utilizando solamente muestras del fuste, con lo cual resultó que la densidad básica de la madera para la especie *Centrolobium tomentosum* fue 0.53 g/cm³ (árboles con 6 a 13 años de edad) y 0.45 g/cm³ para *Schizolobium parahyba* (árboles con 6 a 14 años de edad). Estos últimos valores son muy próximos a los reportes publicados por otros autores.

Cuadro 5. Comparación de medias (LSD Fisher) entre las edades

Edades	Medias	n	Grupos
<i>Centrolobium tomentosum</i>			
3.0 a 5.9	0.44	70	A
6.0 a 13.0	0.46	60	B
<i>Schizolobium parahyba</i>			
3.0 a 5.9	0.30	65	A
6.0 a 14.0	0.42	60	B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<=0.05)

Cuadro 6. Comparación de medias (LSD Fisher) entre los componentes del árbol

Componentes	Medias	n	Grupos
<i>Centrolobium tomentosum</i>			
Rama	0.39	52	A
Fuste	0.52	78	B
<i>Schizolobium parahyba</i>			
Rama	0.33	50	A
Fuste	0.38	75	A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

Se pudo observar también que *Schizolobium parahyba* presenta una mayor desviación estándar con relación a *Centrolobium tomentosum* (Figura 16).

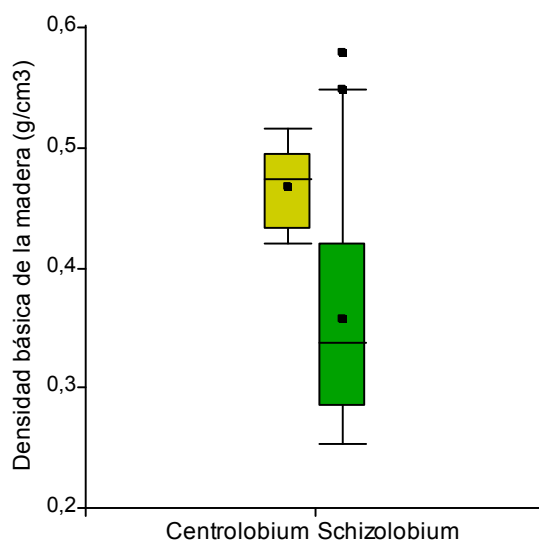


Figura 16. Variación de la densidad básica para las especies estudiadas.

4.2 Contenido de carbono en la biomasa aérea de las especies estudiadas

El porcentaje de contenido de carbono en la biomasa aérea de las especies nativas estudiadas fue 52.27 y 51.16 para la especie *Centrolobium tomentosum* y *Schizolobium parahyba* respectivamente (Cuadro 7 y 8). Ambos resultados están dentro el rango (43 a 58%) mencionado por IPCC (1996). Birdsey (1992) citado por McNulty (2002) determinó que el contenido de carbono orgánico en los árboles del norte y sur de Estados Unidos es de 50 a 53%. Díaz et ál. (2007) reportan 50.3% para *Pinus patula* de México. Por su parte Kurbanov

(2000) reporta un rango más amplio (47 a 58%) para Pinos de Rusia. En otro estudio realizado para 19 especies nativas del oriente y *Pinus radiata* de Australia, el contenido de carbono en la biomasa se encuentra entre 45 y 55% (Gifford, 2000). Por su parte Francis (2000) a través de un estudio para bosques tropicales secundarios de Puerto Rico reporta un rango entre 50 y 52% de carbono orgánico en la biomasa. Sin embargo, Segura (1999) encontró 46% de carbono orgánico para nueve especies nativas del bosque húmedo de Costa Rica, Solíz (1998) determinó 43% para 12 especies del bosque sub húmedo estacional de Santa Cruz (Bolivia) y Andrade (1999) reporta un promedio de 46% para *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* (árboles en sistemas silvopastoriles).

Cuadro 7. Contenido de carbono orgánico en la biomasa de las especies estudiadas

Especie	Fuste (%)	Rama (%)	Follaje (%)	Promedio (%)
<i>Centrolobium tomentosum</i>	53.68	53.19	48.54	51.80
<i>Schizolobium parahyba</i>	54.21	54.38	41.85	50.15

Cuadro 8. Estadística descriptiva para el contenido de carbono (%) en la biomasa de las especies estudiadas

Variable	n	Media	D.E.	Var(n-1)	E.E.	CV	L.I.	L.S.
<i>Centrolobium tomentosum</i>	104	51.805	3.327	11.067	0.652	6.422	44.670	56.260
<i>Schizolobium parahyba</i>	100	50.147	3.109	9.663	0.622	6.199	42.590	54.950

D.E. = Desviación estándar; Var (n-1) = Varianza; E.E. = Error estándar; Coeficiente de variación; L.I. = Límite inferior y L.S. = Límite superior.

El resultado del análisis de varianza y comparación de medias (LSD Fisher) permitió afirmar la existencia de diferencias significativas (Anexo 9) del promedio de contenido de carbono orgánico en la biomasa entre las especies estudiadas (p-valor = 0.029) y entre sus componentes (p-valor = <0.0001), siendo mayor el contenido de carbono orgánico en los componente rama y fuste (53.76% y 53.93% respectivamente) y menor en las hojas (45.25%). También se observó que la especie *Schizolobium parahyba* tiene una mayor variabilidad que *Centrolobium tomentosum* (Figura 17).

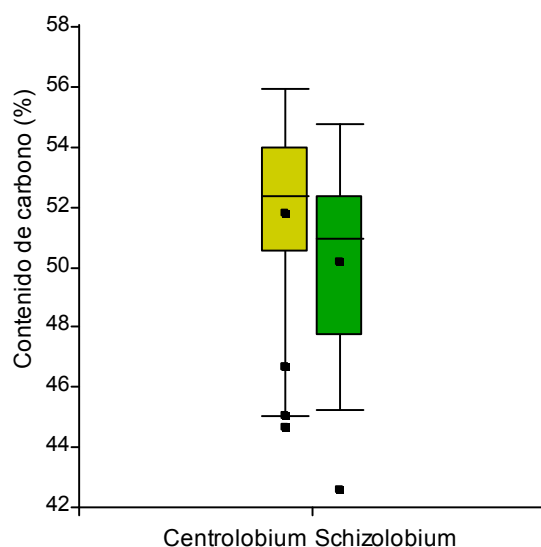


Figura 17. Variación del contenido de carbono orgánico en la biomasa y sus correspondientes medias para las especies estudiadas.

A través de un análisis de correlación (Coeficiente de correlación de Pearson) se determinó que para las especies estudiadas, el porcentaje de carbono orgánico en la biomasa no tiene una estrecha relación con la densidad básica de la madera. Esto debido a que el coeficiente de correlación de Pearson para la especie *Centrolobium tomentosum* es 0.25 ($p = 0.2751$) y 0.37 ($p = 0.0715$) para la especie *Schizolobium parahyba* (Anexo 10).

4.3 Modelos alométricos para la estimación de volumen comercial

Con base en las variables independientes (dap y altura total) y la variable dependiente (volumen comercial) se ajustaron varios modelos (Cuadro 9). Se hicieron transformaciones de las variables a raíz cuadrada y logaritmo natural, con el fin de mejorar el ajuste de los modelos alométricos.

Cuadro 9. Ámbito de validez de los modelos probados

Especie	n	Mínimo-Máximo dap (cm)	Mínimo-Máximo hc (m)	Vc promedio (m ³ /árbol)
<i>Centrolobium tomentosum</i>	26	10.1 – 36.6	4.2 – 12.0	0.25
<i>Schizolobium parahyba</i>	25	13.4 – 54.4	5.6 – 17.1	0.86

n = Número de muestras; dap = diámetro a la altura del pecho; hc = Altura comercial; vc = Volumen comercial; L.I. = Límite inferior; L.S. = Límite superior

4.3.1 Modelos de volumen comercial para *Centrolobium tomentosum*

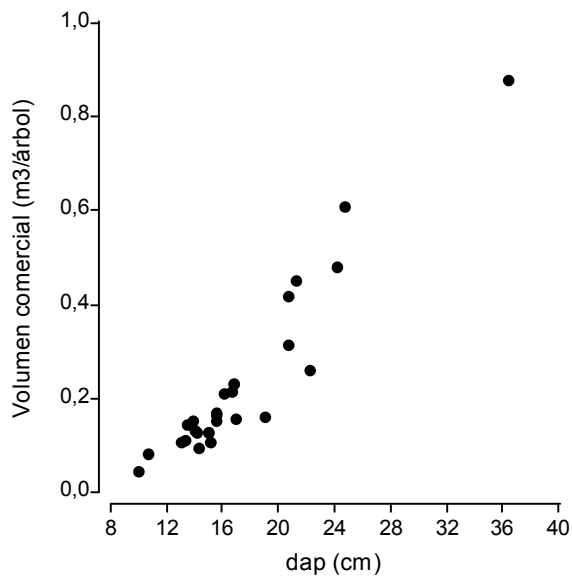


Figura 18. Relación entre volumen comercial y dap de *Centrolobium tomentosum*.

En el Cuadro 10 se presentan solamente los cuatro mejores modelos alométricos de volumen comercial ajustados para la especie *Centrolobium tomentosum*; dos modelos con dos variables independientes (dap y altura comercial) y otros dos modelos con una sola variable (dap) (Figuras 19 a 21). Los modelos seleccionados superan el valor de 0.89 R^2 ajustado. El mejor modelo ajustado resultó la combinación de dos variables independientes (dap y altura comercial) y con transformación a logaritmo natural de la altura comercial. El dap fue la variable más correlacionada ($r = 0.95$) con el volumen comercial (Figuras 18). Al menos todos los parámetros fueron significativos con una confianza de 95% (Anexo 13).

Moret y Ruiz (1998) coinciden en seleccionar como los mejores modelos para estimar el volumen, a la combinación de dos variables independientes (en este caso dap y hc) y la transformación a LN de las variables independientes.

Cuadro 10. Modelos alométricos de volumen y estadísticos obtenidos para *Centrolobium tomentosum*

No	Modelo	Parámetros			R ² Aj.	ECMP (%)	p-Valor	AIC	BIC
		β_0	β_1	β_2					
1*	$VC=(\beta_0+\beta_1*dap+\beta_2*LN(hc))^2$	-0.341	0.026	0.183	0.99	0.0005	<0.0001	-132.4	-127.4
2*	$VC=(\beta_0+\beta_1*dap+\beta_2*hc)^2$	-0.165	0.026	0.025	0.99	0.0005	0.0001	-131.5	-126.4
3	$VC= \beta_0+\beta_1*dap+\beta_2*dap^2$	0.240	0.030	0.0002	0.90	0.0191	<0.0001	-68.3	-63.3
4*	$VC=(\beta_0+\beta_1*dap)^2$	-0.012	0.028	---	0.89	0.0040	<0.0001	-74.4	-70.6

VC = Volumen comercial (m³); *Indica variable dependiente transformada a raíz cuadrada; dap = Diámetro a la altura del pecho (cm); hc = Altura comercial (m); β_0 , β_1 y β_2 = Parámetros estimados; R² Aj.= Coeficiente de determinación ajustado; ECMP =Error cuadrático medio ponderado; AIC = Criterio de Información Akaike; BIC = Criterio de información Bayesiano.

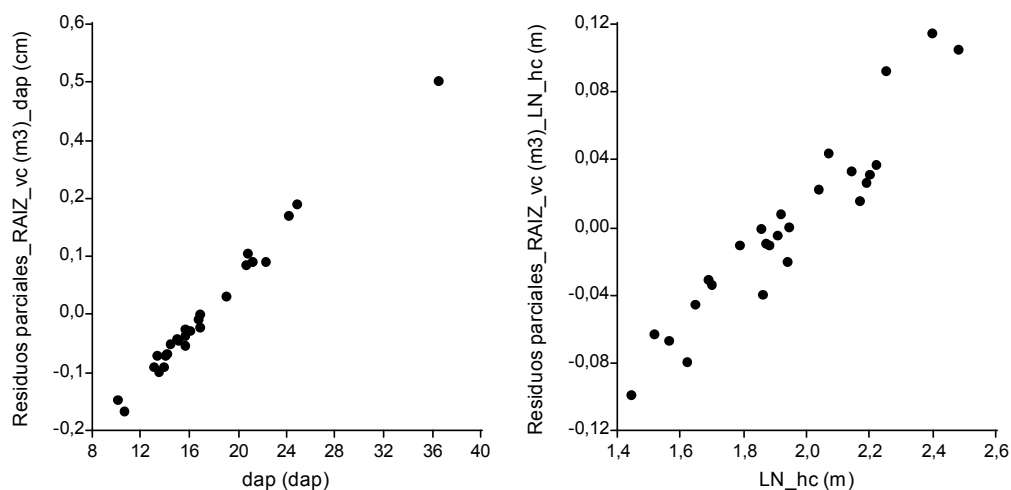


Figura 19. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y hc para el Modelo 1.

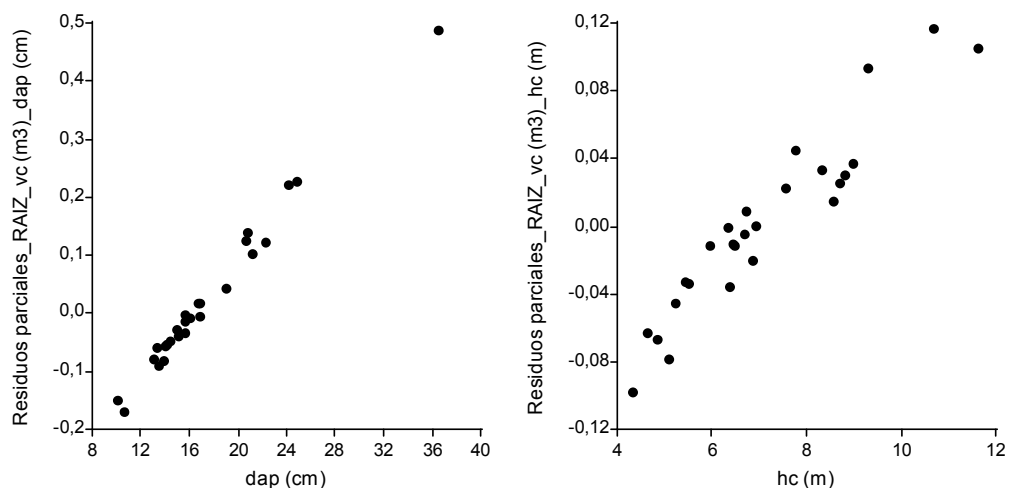


Figura 20. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y hc para el Modelo 2.

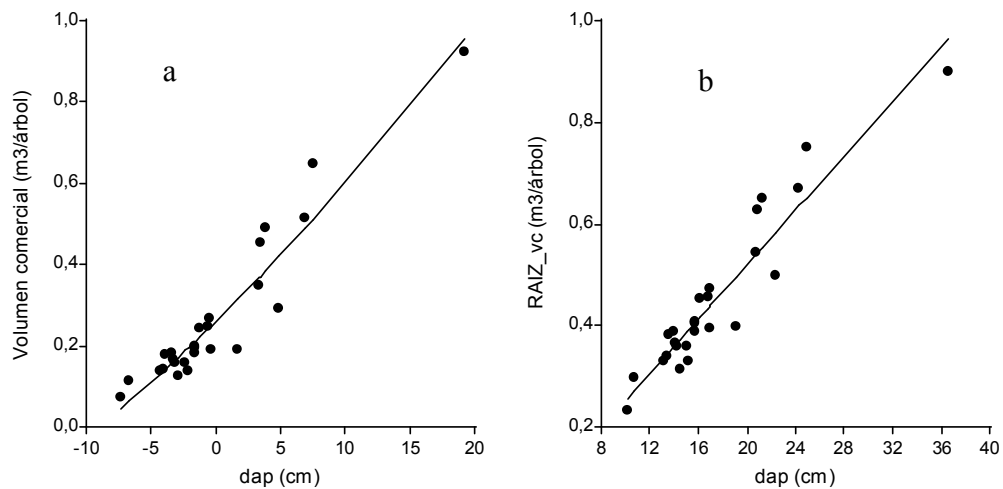


Figura 21. Dispersión del vc en función del dap para el Modelo 3 (a) y el Modelo 4 (b).

4.3.2 Modelos de volumen comercial para *Schizolobium parahyba*

En el Cuadro 11 se presentan los cuatro mejores modelos de volumen comercial para la especie *Schizolobium parahyba*, en forma ordenada, siendo el primer modelo con mejor ajuste (Figura 23 a 25). Todos los modelos tienen coeficientes de determinación bastante altos (mayores a 0.95 de R^2 ajustados). Todos los parámetros fueron significativos con una confianza de 95% (Anexo 16). El dap fue la variable independiente mejor correlacionada ($r = 0.95$) con el volumen comercial (Figura 22).

Se puede observar que el AIC y BIC disminuyen y el R^2 ajustado aumenta cuando se agrega la variable independiente altura comercial (Cuadro 11). Por tanto, el mejor modelo para esta especie es la combinación de las variables independientes, en este caso dap y altura comercial. Generados los modelos se graficó la dispersión de los residuos contra los valores predichos de la biomasa aérea y no se observó una tendencia que pudiera rechazar los resultados de los análisis realizados (Anexo 16).

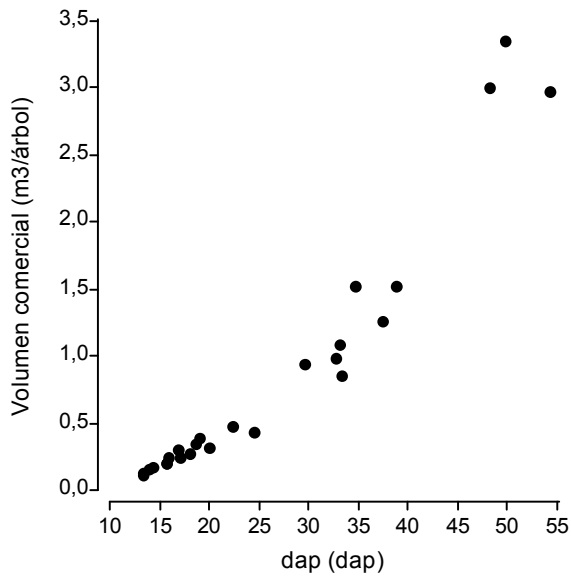


Figura 22. Distribución del volumen comercial con respecto al dap de *Schizolobium parahyba*.

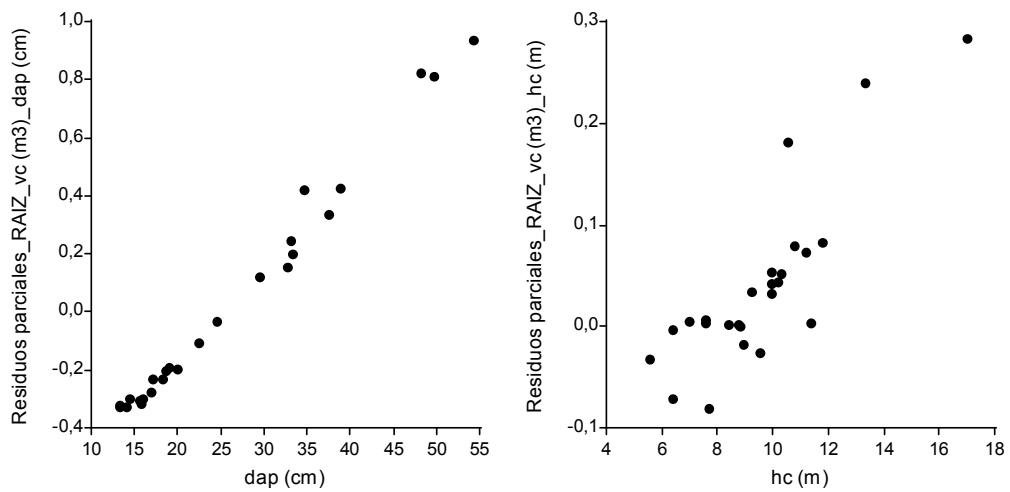


Figura 23. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y hc para el Modelo 1.

Los estadígrafos (AIC, BIC y ECMP) ayudaron a seleccionar dos modelos que resultaron tener el mismo R^2 ajustado, como es el caso de los Modelos 1 y 2. Moret y Ruiz (1998) coinciden en seleccionar como los mejores modelos para estimar el volumen, a la combinación de dos variables independientes (en este caso dap y hc) y la transformación a LN para estas variables independientes.

Cuadro 11. Modelos alométricos de volumen comercial y estadígrafos obtenidos para *Schizolobium parahyba*

No.	Modelo	Parámetros			R ² Aj.	ECMP (%)	p-Valor	AIC	BIC
		β_0	β_1	β_2					
1*	$VC=(\beta_0+\beta_1*dap+\beta_2*hc)^2$	-0.337	0.033	0.030	0.99	0.003	<0.0001	-75.9	-71.0
2*	$VC=(\beta_0+\beta_1*dap+\beta_2*Ln(hc))^2$	-0.659	0.033	0.269	0.99	0.004	<0.0001	-69.8	-64.9
3*	$VC=(\beta_0+\beta_1*dap)^2$	-0.141	0.036	---	0.97	0.008	<0.0001	-53.8	-50.2
4	$VC=\beta_0+\beta_1*dap+ \beta_2*dap^2$	0.633	0.058	0.002	0.96	0.100	<0.0001	-3.7	1.2

VC = Volumen comercial (m³); *Indica variable dependiente transformada a raíz cuadrada; dap = Diámetro a la altura del pecho (cm); hc = Altura comercial (m); β_0 , β_1 y β_2 = Parámetros estimados; R² Aj.= Coeficiente de determinación ajustado; ECMP =Error cuadrático medio ponderado; AIC = Criterio de Información Akaike; BIC = Criterio de información Bayesiano.

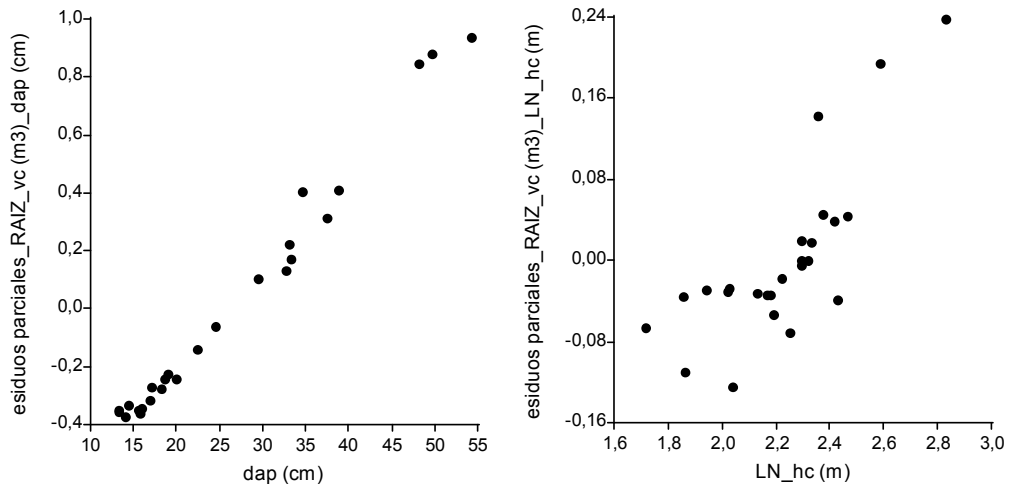


Figura 24. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y LN_hc para el Modelo

2.

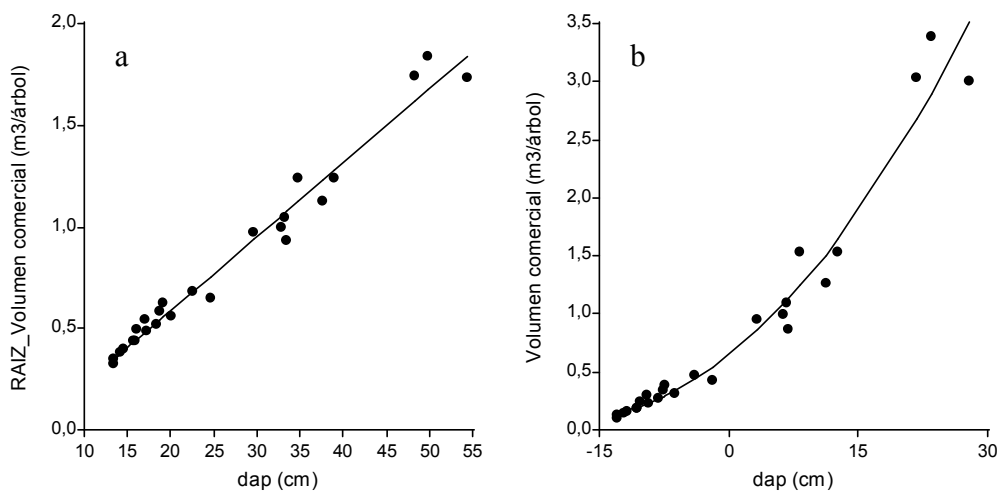


Figura 25. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap para el Modelo 3 (a) y Modelo 4 (b).

4.4 Biomasa aérea y FEB para *Centrolobium tomentosum* y *Schizolobium parahyba*

El promedio de la biomasa aérea (Cuadro 12) fue 214.15 kg/árbol para la especie *Centrolobium tomentosum* (árboles con dap entre 10.1 y 36.6 cm) y 551.62 kg/árbol para *Schizolobium parahyba* (árboles con dap entre 13.4 y 54.4 cm).

El fuste tiene la mayor participación en la biomasa aérea; 53.01% en la especie *Centrolobium tomentosum* y 56.18% en *Schizolobium parahyba*, seguido por ramas y hojas (Figura 26). La biomasa varía con la edad del árbol (Anexos 17 y 18).

Según Suárez, et ál. (2004) la biomasa del fuste constituye el 52% de la biomasa total. Sin embargo, los siguientes autores reportan porcentajes superiores al valor encontrado en la presente investigación. Monroy y Návar (2004) encontraron que el fuste representa el 72.8% de la biomasa aérea de *Hevea brasiliensis* de Vera Cruz, México. Por su parte, Gayoso et ál. (2002) determinaron que aproximadamente el 70% de la biomasa aérea se encuentra en el fuste para las especies nativas y exóticas de 14 áreas forestales de Chile. Avendaño (2008) reporta un valor más alto inclusive para las especies *Bombacopsis quinata*, *Cordia alliodora* y *Terminalia oblonga* de Guanacaste, Costa Rica (el 83% de la biomasa aérea se encuentra en el fuste). Es de notar, sin embargo, que el porcentaje de biomasa acumulado en el fuste y otros componentes del árbol depende básicamente de las características de cada especie, la edad y el manejo dado al rodal. Sucesos tales como las podas y los raleos, afectan la distribución de biomasa del rodal por componentes.

Cuadro 12. Participación de los componentes del árbol en la biomasa aérea de las especies estudiadas

Variable	n	Media	Porcentaje	D.E.	L.I.	L.S.
<i>Centrolobium tomentosum</i>						
Biomasa de fuste (kg)	26	113.52	53.01	85.92	28.17	404.22
Biomasa de ramas (kg)	26	84.41	39.42	96.95	4.58	499.43
Biomasa de hojas (kg)	26	16.22	7.57	16.84	4.66	89.16
Biomasa aérea (kg)	26	214.15	100.00	187.50	45.73	992.80
<i>Schizolobium parahyba</i>						
Biomasa de fuste (kg)	25	309.91	56.18	348.45	37.07	1218.80
Biomasa de ramas (kg)	25	209.35	37.95	317.37	11.03	1398.31
Biomasa de hojas (kg)	25	32.36	5.87	34.77	4.28	130.68
Biomasa aérea (kg)	25	551.62	100.00	674.07	60.53	2611.83

n = Número de muestras; D.E. = Desviación estándar; L.I. = Límite inferior; L.S. = Límite superior

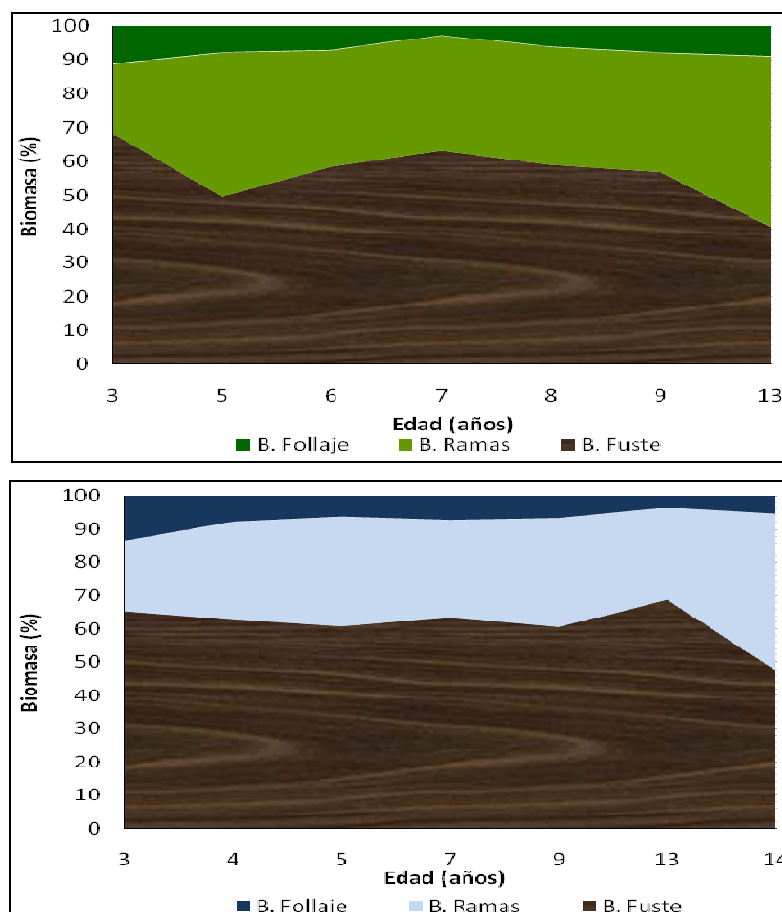


Figura 26. Participación de los componentes del árbol en la biomasa aérea de *Centrolobium tomentosum* (a) y *Schizolobium parahyba* (b).

Cuadro 13. Participación de los componentes del árbol en la biomasa aérea de las especies estudiadas

<i>Centrolobium</i>		<i>Schizolobium</i>	
Edad (años)	FEB	Edad (años)	FEB
3	1.5	3	1.5
5	2.2	4	1.6
6	1.8	5	1.8
7	1.6	7	1.6
8	1.8	9	1.7
9	1.8	13	1.5
13	2.5	14	2.1
PP	1.9	PP	1.7

FEB = Factor de expansión de biomasa; PP = Promedio ponderado

El promedio de factor de expansión de biomasa fue 1.9 para *Centrolobium tomentosum* y 1.7 para *Schizolobium parahyba* (Cuadro 13). Se observó que la especie *Centrolobium tomentosum* tiene mayor variación con respecto a *Schizolobium parahyba* (Figura 27). Husch (2001) recomienda utilizar 1.9 como FEB. Según Andrade e Ibrahim (2003) el FEB se encuentra entre 1.9 a 2.4 para sistemas agroforestales. Sin embargo, Dauber (2001) reporta un factor de expansión de biomasa para la Amazonia boliviana de 2.2, mayor al resultado de la presente investigación. Por su parte Solíz (1998) en un estudio realizado en el bosque sub-húmedo de Santa Cruz, Bolivia determinó que el promedio de FEB es 2.5 y Brown (1997a) determinó 1.7 para bosque de la Amazonía. Según Dixon (1995) citado por Andrade e Ibrahim (2003) el valor más empleado es 1.6. Ruiz (2002) determinó 1.6 de FEB para siete especies arbóreas dispersas en pasturas de Matiguás, Nicaragua (*Cassia grandis*, *Platymiscium pleiostachyum*, *Pithecellobium saman*, *Guazuma ulmifolia*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Cordia alliodora* y *Tabebuia rosea*) y Avendaño (2008) determinó 1.4 para las especies *Bombacopsis quinata*, *Cordia alliodora* y *Terminalia oblonga* de Guanacaste, Costa Rica.

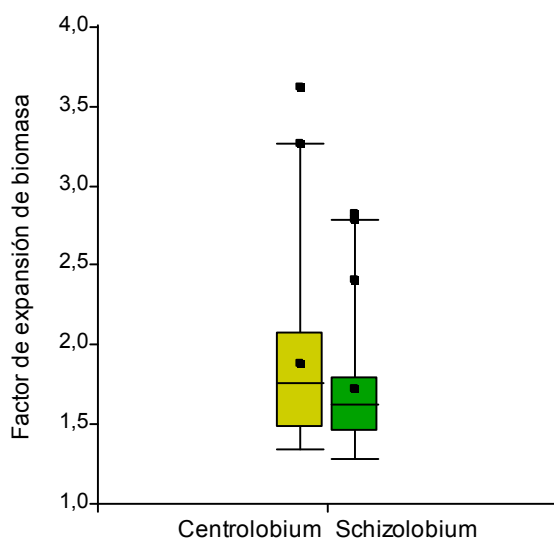


Figura 27. Distribución del factor de expansión de biomasa en las especies estudiadas.

4.5 Modelos alométricos para la estimación de la biomasa aérea

Con base en la variable dependiente (biomasa total) y las variables independientes (dap, altura comercial y altura total), se ajustaron varios modelos (Cuadro 14). Se hicieron transformaciones de las variables a raíz cuadrada y logaritmo natural, con el fin de mejorar el ajuste de los modelos alométricos.

Cuadro 14. Variables de los datos para la estimación de biomasa aérea de las especies estudiadas

Especie	n	Mín. – Máx. dap (cm)	Mín.– Máx. hc (m)	Mín. – Máx. ht (m)	ba (Kg/árbol)
<i>Centrolobium tomentosum</i>	26	10.1 – 36.6	4.2 – 12.0	7.5 – 20.3	214.15
<i>Schizolobium parahyba</i>	25	13.4 – 54.4	5.6 – 17.1	5.5 – 28.5	551.62

n = Número de muestras; dap = diámetro a la altura del pecho; hc = Altura comercial; ht = Altura total; ba = Biomasa aérea; L.I. = Límite inferior; L.S. = Límite superior

4.5.1 Modelos alométricos de biomasa aérea para *Centrolobium tomentosum*

La variable altura total para esta especie fue descartada por presentar una alta dispersión con respecto a la biomasa aérea. El dap fue la variable independiente más correlacionada ($r = 0.93$) con la biomasa aérea (Figura 28). En el Cuadro 15 se presentan los cuatro modelos alométricos que mejor representan a la biomasa aérea (dos modelos con dos regresoras y otros dos modelos con una regresora) de *Centrolobium tomentosum* (Figuras 29 a 31). En este caso el modelo lineal con una sola variable independiente (dap) es el que mejor ajustó a la biomasa aérea.

Los modelos ajustados superan el valor de $0.88 R^2$ ajustado. Generados los modelos se graficó la dispersión de los residuos contra los valores predichos de la biomasa aérea y no se observó una tendencia que pudiera rechazar los resultados de los análisis realizados (Anexo 20).

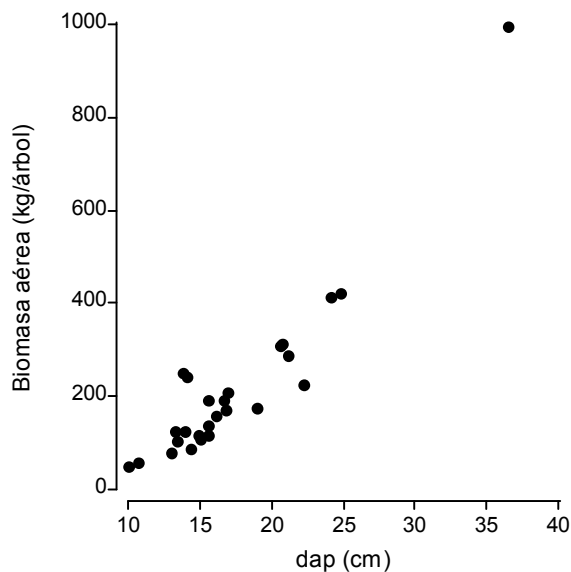


Figura 28. Distribución de la biomasa aérea con respecto a dap de *Centrolobium tomentosum*.

Todos los modelos consideran los contrastes necesarios para asegurar su validez estadística y son concordantes en estructura con modelos seleccionados por otros autores. Por ejemplo Merino et ál. (2003), Montero y Montagnini (2005), Watzlawick, et ál. (2001), Muukkonen y Makipaa (2006) y UNC (2003).

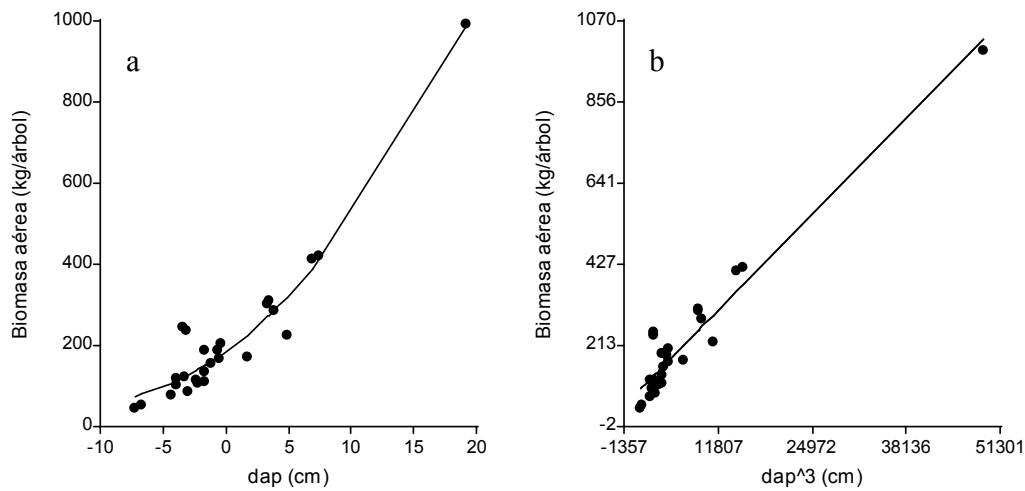


Figura 29. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap para el Modelo 1 (a) y Modelo 3 (b).

Cuadro 15. Modelos alométricos de biomasa total y estadígrafos obtenidos para *Centrolobium tomentosum*

No	Modelo	Parámetros			R ² Aj.	ECMP (%)	p-Valor	AIC	BIC
		β_0	β_1	β_2					
1	$BA = \beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 * dap^2$	185.149	22.447	1.012	0.93	3176	<0,0001	280.7	285.8
2	$BA = \beta_0 + \beta_1 * dap^3$	78.344	0.019	---	0.93	42.75	<0,0001	281.4	285.2
3*	$BA = (\beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 * Ln(hc))^2$	-5.700	0.862	2.310	0.89	3.910	<0.0001	106.7	111.8
4*	$BA = (\beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 * hc)^2$	-3.178	0.862	0.270	0.88	4.130	<0.0001	107.8	112.5

BA = Biomasa aérea (Kg); *Indica variable dependiente transformada a raíz cuadrada; dap = Diámetro a la altura del pecho (cm); hc = Altura comercial (m); β_0 , β_1 y β_2 = Parámetros estimados; R² Aj.= Coeficiente de determinación ajustado; ECMP =Error cuadrático medio ponderado; AIC = Criterio de Información Akaike; BIC = Criterio de información Bayesiano.

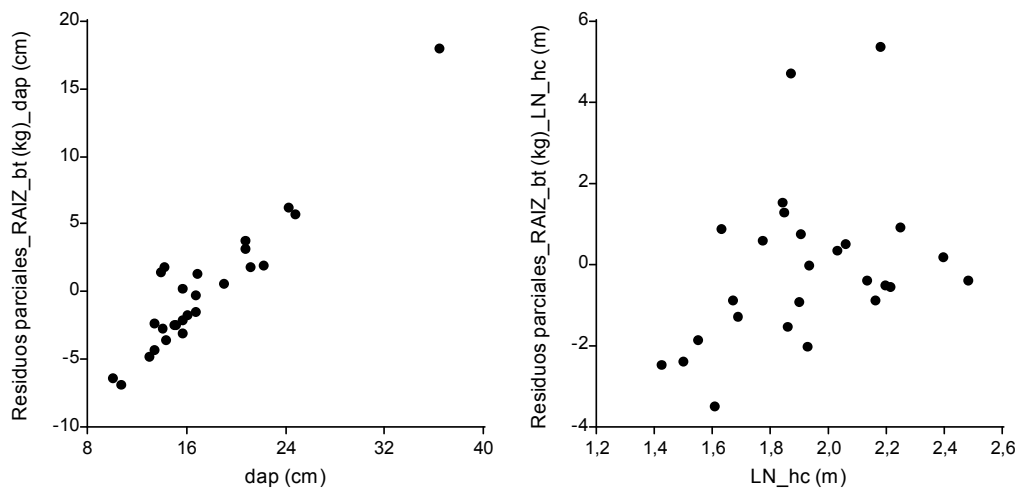


Figura 30. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y hc para el Modelo 2.

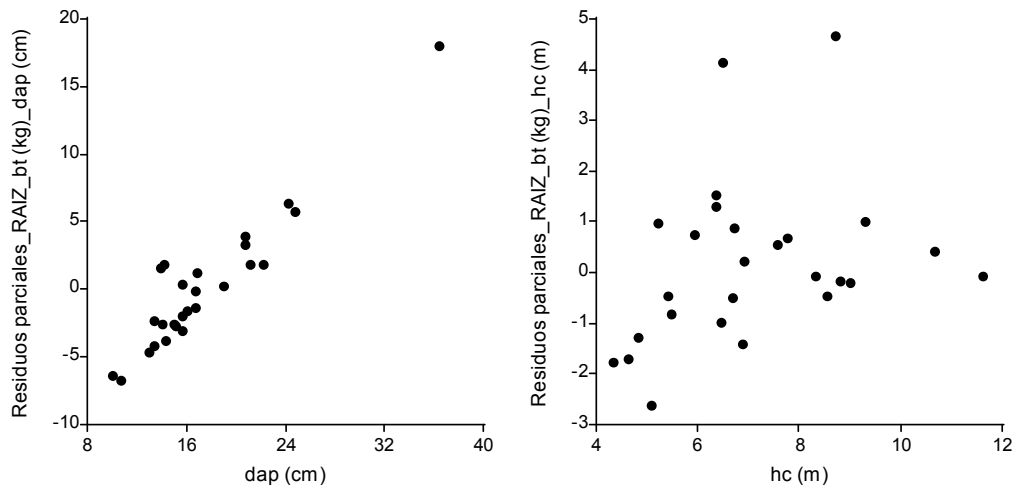


Figura 31. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y hc para el Modelo 4.

4.5.2 Modelos alométricos de biomasa aérea para *Schizolobium parahyba*

En el Cuadro 16 se presentan los cuatro modelos alométricos que mejor ajustan a la biomasa aérea de la especie *Schizolobium parahyba*; dos modelos con dos variables independientes (dap y altura total) y dos modelos con una sola variable independiente (dap). La variable independiente altura comercial se descartó por presentar una alta dispersión con respecto a la biomasa aérea.

La variable independiente más correlacionada con la biomasa aérea fue el dap (Figura 32). En la mayoría de los trabajos realizados en zonas tropicales se ha encontrado que la variable independiente que mejor explica la biomasa de un árbol es el diámetro a la altura del pecho (Overman et ál., 1994; Regina, 2000), al igual que en zonas templadas (Chave et ál., 2001). Muchos autores lo consideran por ser de fácil medición y además lo utilizan multiplicando por otras variables o expresando bajo algún tipo de transformación.

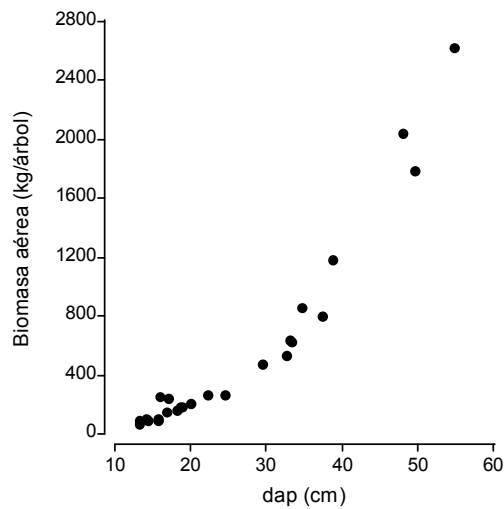


Figura 32. Distribución de la biomasa aérea con respecto a dap de *Schizolobium parahyba*.

Todos los parámetros fueron significativos con una confianza de 95% (Anexo 21). Los modelos tienen un coeficiente de determinación bastante altos. Estos explican en todos los casos más del 97%.

En el Cuadro 16 se puede observar que cuando se agrega la altura total a la variable independiente dap, el AIC y BIC disminuyen y el R^2 ajustado aumenta. Esto nos explica que con dos variables independientes podemos estimar mejor la biomasa aérea de esta especie (Figuras 33 a 35). Generados los modelos se graficó la dispersión de los residuos contra los valores predichos de la biomasa aérea y no se observó una tendencia que pudiera rechazar los resultados de los análisis realizados (Anexo 21).

Todos los modelos consideran los contrastes necesarios para asegurar su validez estadística. Además los modelos seleccionados han proporcionado buenos ajustes en otras especies tropicales. Por ejemplo, Deans et ál. (1996) ajustaron para especies arbóreas del Camerún, Montero y Montagnini (2005) utilizando estos modelos obtuvieron buen ajuste para especies nativas de la región Atlántica de Costa Rica, Watzlawick et ál. (2001) para *Araucaria angustifolia* de Brasil, Muukkonen y Makipaa (2006) para especies forestales de Europa, Etchevers et ál. (2002) para especies nativas de los bosques mesófilos de México, Lin et ál. (2001) para especies forestales de Taiwan y Merino et ál. (2003) para *Pinus radiata* de Galicia.

Cuadro 16. Modelos alométricos de biomasa total y estadígrafos obtenidos para *Schizolobium parahyba*

No	Modelo	Parámetros			R ² Ajustado	ECMP (%)	p- Valor	AIC	BIC
		β_0	β_1	β_2					
1*	$BA=(\beta_0+\beta_1*dap^2+\beta_2*ht)^2$	4.590	0.014	0.234	0.98	3.608	<0.0001	100.8	105.7
2*	$BA=(\beta_0+\beta_1*dap+c*dap^2)^2$	18.888	0.863	0.009	0.98	4.621	<0.0001	107.9	112.7
3*	$BA=(\beta_0+\beta_1*dap+\beta_2*ht)^2$	-7.097	0.908	0.219	0.97	5.386	<0.0001	110.4	115.2
4*	$BA=(\beta_0+\beta_1*dap^2)^2$	7.692	0.015		0.97	5.267	<0.0001	110.7	114.3

BA = Biomasa aérea (Kg); *Indica variable dependiente transformada a raíz cuadrada; dap = Diámetro a la altura del pecho (cm); hc = Altura comercial (m); β_0 , β_1 y β_2 = Parámetros estimados; R² Aj.= Coeficiente de determinación ajustado; ECMP =Error cuadrático medio ponderado; AIC = Criterio de Información Akaike; BIC = Criterio de información Bayesiano.

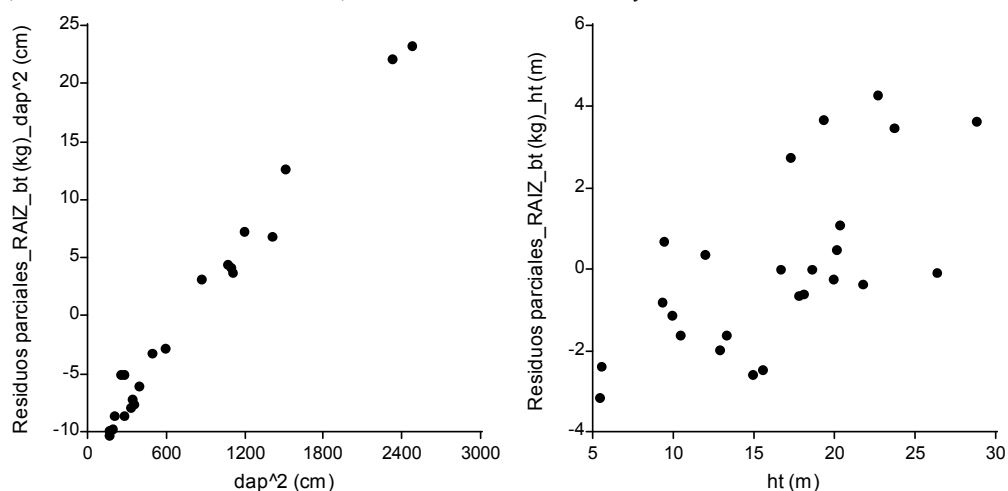


Figura 33. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y ht para el Modelo 1.

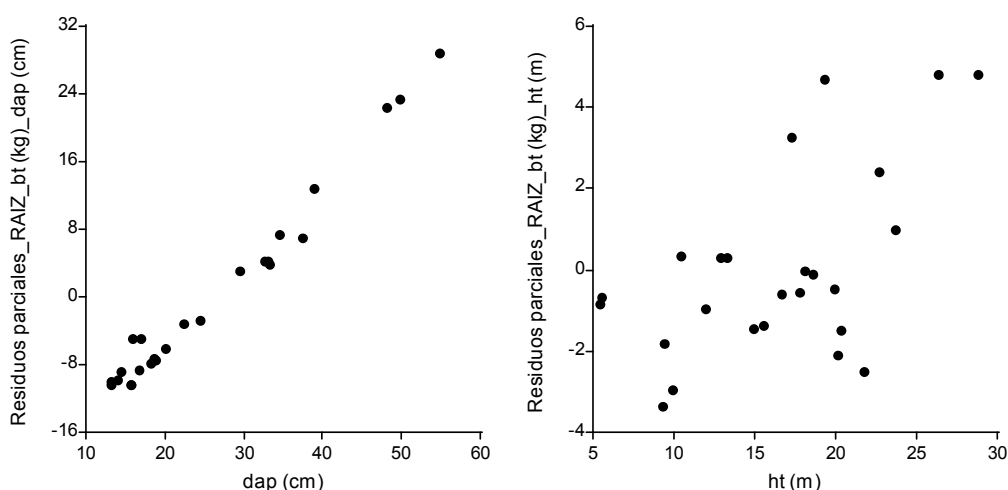


Figura 34. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap y ht para el Modelo 3.

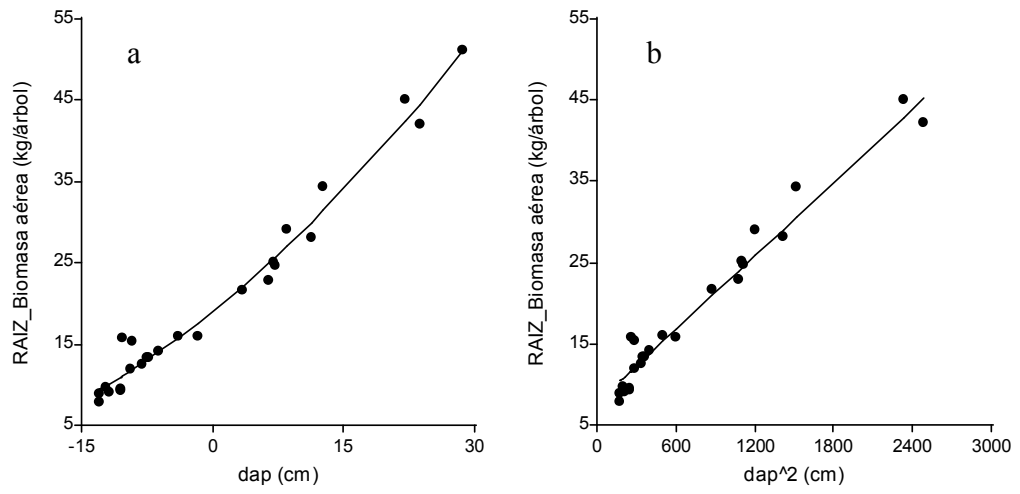


Figura 35. Dispersión de residuos parciales de vc en función del dap para el Modelo 2 (a) y Modelo 4 (b).

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se observó que la densidad básica de la madera para las especies estudiadas varía con la edad y los componentes del árbol. Es así que la densidad básica con muestras de fuste comercial, ramas y edades entre 3 y 13 años para *Centrolobium tomentosum* y 3 a 14 años para *Schizolobium parahyba*, resultaron menores (0.46 y 0.36 g/cm³ para *Centrolobium tomentosum* y *Schizolobium parahyba* respectivamente) que los valores obtenidos con solamente muestras del fuste comercial y edades mayores a seis años (0.53 g/cm³ para la especie *Centrolobium tomentosum* y 0.45 g/cm³ para *Schizolobium parahyba*).

Se encontraron diferencias significativas del contenido de carbono orgánico en la biomasa aérea entre las especies nativas estudiadas (52.27 y 51.16% para la especies *Centrolobium tomentosum* y *Schizolobium parahyba* respectivamente). Igualmente se encontraron variaciones significativas entre los componentes del árbol.

Existe una correlación muy baja entre la densidad básica de la madera y el carbono orgánico en la biomasa aérea ($r = 0.25$ para *Centrolobium tomentosum* y $r = 0.37$ para la especie *Schizolobium parahyba*).

El promedio de la biomasa aérea fue mayor en la especie *Schizolobium parahyba* con respecto a *Centrolobium tomentosum*. En cuanto al promedio de la distribución de la biomasa en los componentes del árbol, el mayor porcentaje se encuentra en el fuste; 53% en la especie *Centrolobium tomentosum* (para diámetros comprendidos entre 10.1 y 36.6 cm) y 56% en la especie *Schizolobium parahyba* (para diámetros comprendidos entre 13.4 y 54.4). Seguido por las ramas y hojas.

Los modelos alométricos ajustados para predecir el volumen comercial y la biomasa aérea de las dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia, mostraron altos coeficientes de determinación ajustado (R^2 Ajustado) mayores a 0.88 y 0.96 para *Centrolobium tomentosum* y *Schizolobium parahyba* respectivamente.

La combinación del dap y altura comercial es la que mejor explican el volumen comercial de las especies estudiadas (0.99 R^2 Ajustado). Sin embargo, para la estimación de

biomasa aérea, las variables independientes que mejor explicaron son; dap (0,93 R² Ajustado para *Centrolobium tomentosum*) y la combinación de la variable dap con la altura total (0.98 R² Ajustado para la especie *Schizolobium parahyba*).

Para este trabajo de investigación los modelos lineales con transformaciones de las variables independientes o dependientes ajustaron mejor el volumen comercial y la biomasa aérea de las especies estudiadas.

Los parámetros técnicos y modelos alométricos generados en el presente estudio son la herramienta primaria para poder realizar cuantificaciones confiables de existencias de carbono en los árboles de *Centrolobium tomentosum* y *Schizolobium parahyba* de las plantaciones forestales del trópico de Cochabamba. También permiten estimar los cambios que se producen a lo largo de los ciclos de vida de los rodales, con base en la información de Parcelas Permanentes de Monitoreo (PPMs).

5.2 Recomendaciones

Para fines de cuantificación de biomasa aérea, se recomienda utilizar el promedio de la densidad básica de la madera que incluye muestras de fuste, ramas y edades mayores a tres años. En virtud de que existe diferencia significativa con la densidad básica de la madera que solamente fue determinada con las muestras del fuste y edades mayores a seis años.

Debido a que el contenido de carbono en la biomasa de las especies estudiadas es estadísticamente diferente, para efectos de la cuantificación de captura de dióxido de carbono en la biomasa, se recomienda el empleo de contenido de carbono por especie.

Por su simplicidad, se recomiendan los modelos con una sola variable independiente (dap), debido a que es la medición más exacta que se tiene de los inventarios de plantaciones forestales y es la variable más fácil de medir.

Si se desea utilizar los modelos alométricos generados en esta investigación, se debe tener en cuenta el ámbito de datos con los que fueron generados y las condiciones de la región del presente estudio.

En el presente trabajo de investigación solamente se determinó la biomasa aérea, pero es importante incluir posteriormente, la determinación de la biomasa de las raíces, ya que varios autores coinciden en que la biomasa de la raíces contiene entre 15 a 25% de la biomasa total (UNC, 2003).

Es importante considerar las variables de sitio y manejo de las plantaciones para futuras investigaciones sobre la elaboración de modelos alométricos de biomasa.

Resulta de gran interés contar con modelos alométricos para otras especies nativas como *Dipteryx odorata* (Almendrillo), *Ochroma lagopus* (Balsa), *Calophyllum brasiliense* (Palo María), *Guarea guidonia* (Trompillo), *Terminalia amazonia* (Verdolago) y otras, que permitan la estimación de la biomasa sin necesidad de realizar en cada ocasión el proceso completo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M.; Vargas, J.; Velásquez, A.; Etchevers, J. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*. 36 (6): 725 – 736.
- Alba, E. 2007. Evaluación de la calidad de sitio para *Centrolobium tomentosum* Guill. ex Benth en plantaciones forestales en tres zonas del trópico de Cochabamba, Bolivia. Tesis Ing. Forestal. ESFOR-UMSS. Cochabamba, Bolivia. 81p.
- Andrade, H; Ibrahim, M. 2003. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas*. 10 (39/40): 109 – 116.
- Andrade, H. 1999. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 68 p.
- Avendaño, J. 2008. Modelos genéricos de biomasa aérea para especies forestales en función de la arquitectura y la ocupación del rodal. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 114 p.
- Balzarini, M.G; González, L.A; Tablada, E.M; Casanoves, F; Di Rienzo, J; Robledo, CW. 2008. InfoStat, versión 2008. Manual del usuario. Grupo InfoStat, FCA, Univesidad Nacional de Córdoba. Primera Edición, Editorial Brujas Argentina. Córdoba, Argentina. 334 p.
- Beaudoin, A; Le Toan, T; Goze, S; Nezry, E; Lopes, A; Mougín, E; Hsu, C; Han, H; Kong, J; Shin, R. Retrieval of forest biomass from SAR data. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 15. N° 14. pp. 2777-2796.
- Broad, R. 1998. Allometry and growth. *Forest Science*. 44: 458 – 464.
- Brown, S. 1997a. Estimating biomass and change of tropical forest. A primer. FAO Forestry paper 134. Roma. 55p.
- Brown, S. 1997b. Bosques y cambio climático y la función de los bosques como sumideros de carbono. Antalya, Turquía. s.e. p 2.

- Brown, S; Gillespe, A; Lugo, A. 1989. Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science*. 35(4): 881 – 902.
- Calderón, J; Jong, B; Ochoa, S; March, I; Castillo, M. 1999. Evaluación de dos métodos para la estimación de biomasa arbórea a través de datos LANDSAT TM en Jusnajib, La Laguna, Chiapas, México: Estudio de caso. *Investigaciones Geográficas*. 40: 71 – 84.
- Calderón, S; Gayoso, J; Guerra, J; Schelegel, B. 2003. Inventarios forestales para contabilidad de carbono. (en línea) Consultado el 3 de agosto 2008. Disponible en
- Cámara Forestal de Bolivia (CFB). 2008. Sector forestal: Plantaciones forestales. (en línea). Consultado el 8 de agosto de 2008 disponible en <http://www.cfb.org.bo/CFBInicio/BoliviaForestal/Plantaciones%20Forestales.htm>
- Castañeda, A; Vargas, J; Gómez, A; Valdez, J; Vaquera, H. 2005. Acumulación en la biomasa aérea de una plantación de *Bambusa oldhamii*. *Agrociencia*. 39 (1): 107 – 117.
- Cordero, J; Boshier, D.H; eds.; Barrance, A; Beer, J; Boshier, D.H; Chamberlain, J; Cordero, J; Detlefsen, G; Finegan, B; Galloway, G; Gómez, M; Gordon, J; Hands, M; Hellin, J; Hughes, C; Ibrahim, M; Kass, D; Leakey, R; Mesén, F; Montero, M; Rivas, C; Somarriba, E; Stewart, J; Pennington, T. Oxford Forestry Institute, Oxford (RU). 2003. Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas. CATIE, Turrialba (Costa Rica) Oxford (RU). OFI/CATIE. 1079 p.
- Castro, I; Casado, M.A; Ramírez, L; Miguel, J.M; Costa, M; Díaz, F. 1995. Funciones de estimación de la biomasa aérea de varias especies del matorral mediterráneo del centro de la península Ibérica. *Orsis*. 11: 107 – 116.
- Chave, J.C; Muller, H.C; Baker, T.R; Easdale, T.A; ter Steege, H; Webb, C.O. 2006. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2,456 neotropical tree species. *Ecological Applications*, 16: 2356-2367.
- Chave, J; Riéra, B; Dubois, M. 2001. Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability. *Journal of Tropical Ecology*. 17: 79 – 96.

- Coca, M; Dávalos, I. 2007. Bosques en el trópico de Cochabamba. (En línea). Cochabamba, Bolivia. Consultado 3 de julio 2008. Disponible en http://www.lostiempos.com/oh/02-12-07/02_12_07_actualidad1.php
- Crespo, T; Minnick, G; Vargas, J. 1995. Evaluación de algunas leguminosas en el Trópico de Cochabamba, Bolivia. In: Evans, D. O; Szott, L. T. (Ed.). Nitrogen fixing trees for acid soils: proceedings of a workshop. Morrilton: NFTA: Winroch International. Turrialba, Costa Rica. p 103-112.
- Cubero, J; Rojas, S. 1999. Fijación de carbono en plantaciones de *Gmelina arborea*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Heredia (Costa Rica). Tesis. Lic. Cs. Forestales Universidad Nacional. 93 p.
- Dauber, E; Terán, J; Guzmán, R. 2001. Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. Revista Forestal Iberoamericana Vol. 1 (1):13-23.
- Davel, M; Jovanowski, A; Mohr, D. 2005. Densidad básica de la madera de pino oregón y su relación con las condiciones de crecimiento en la Patagonia Andina Argentina. Bosques 26 (3): 55 – 62.
- Di Rienzo J.A; Balzarini, M.G; Casanoves, F; González, L.A; Tablada, E.M; Díaz, M.P; Robledo, CW. 2001. Estadística para las ciencias agropecuarias. 4ª ed. Editorial Trunfar. Córdoba, Argentina. 322 p.
- Díaz, R; Acosta, M; Carrillo, F; Buendía, E; Flores, E; Etchevers, J.D. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13(1): 25 – 34.
- Díaz, P.P. 2005. Evaluación de propiedades físicas y mecánicas de madera de *Nothofagus glauca* (Hualo) proveniente de la zona de Cauquenes. Tesis Industria de la madera. Universidad de Talca. Talca, Chile. 179 p.
- Enquist, B.J; Brown, J.H; West, G.B. 1998. Allometric scaling of plants energetics and population density. *Nature* . 395:163 – 165.

- Etchevers, J; Vargas, J; Acosta, M; Velásquez, A. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oxaca, Mexico. *Agrociencia*. 36 (6): 725 – 736.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2007b. Los bosques y el cambio climático. (en línea). Consultado el 29 de julio 2008. Disponible en <http://www.fao.org/forestry/foris/pdf/infonotes/infofaospanish-losbosquesyelcambioclimatico.pdf>
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2007. Situación de los bosques del mundo. (en línea). Italia, Roma. Consultado 4 de may. 2007. Disponible en <http://www.fao.org/icalog/inter-s.htm>
- FAO. 2004. Caracterización de peligros de patógenos en los alimentos y el agua. Serie de evaluación de riesgos microbiológicos 3. Roma, Italia. 68 p.
- FAO. 2001. Situación de los bosques del mundo. (en línea). Consultado el 30 de julio de 2008 disponible en <http://www.fao.org/docrep/003/y0900s/y0900s00.htm>
- Ferriols, R; Alós, M; Rius, F; Navarro, L.V. 1995. Predicción de las concentraciones plasmáticas de tobramicina en pacientes sometidos a emodialisis. *Farm Hosp*. 19 (5): 273 – 277.
- Ferrufino, A; Meneses, L. 2003. Mapas de suelos del Trópico de Cochabamba e identificación de restricciones edáficas para cultivos de banano, palmito, piña y pastos. (en línea). Cochabamba, Bolivia. Consultado 2 de may. 2007. Disponible en [http://www.ppi-ppic.org/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/76e0ff758a9dfb2f03256e5700536562/\\$FILE/Ferrufino-Mapa%20Suelos%20Chapare.pdf](http://www.ppi-ppic.org/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/76e0ff758a9dfb2f03256e5700536562/$FILE/Ferrufino-Mapa%20Suelos%20Chapare.pdf)
- Francis, J. 2000. Estimating Biomass and Carbon Content of Saplings in Puerto Rican Secondary Forests. *Caribbean Journal of Science*. 36 (3-4): 346-350.
- Fucaraccio, F; Staffieri, G. 1999. Desarrollo y uso de ecuaciones de volumen y tablas de volumen en la República Argentina. (en línea). Consultado 17 de agosto 2008. Disponible en <http://ceres.agro.unlp.edu.ar/~dasometria/Informe%20Final%20Staffieri%20y%20otro.pdf>

- Gayoso, J; Guerra, J; Alarcón, D. 2002. Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Valdivia, Chile. s.e. 157 p.
- Gayoso, J; Guerra, J. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque*. 26(2): 33 – 38.
- Gifford, R. 2000. Carbon contents of above-ground tissues of forest and woodland trees. Canberra: Australian Greenhouse Office, National Carbon Accounting System, Technical Report N° 22. 17 p.
- Giró, F. 2007. Bosques y cambio climático. (en línea). Consultado el 29 de julio 2008. Disponible en <http://www.ecodes.org/pages/especial/cc/docs/accionnatura.pdf>
- Gutierrez, V.H; Silva, J. 2002. Información técnica para el procesamiento industrial de 134 especies maderables de Bolivia. Serie Técnica XII. Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación. Santa Cruz, La Paz, Bolivia. 352 p.
- Husch, B. 2001. Estimación del contenido de carbono de los bosques. Simposio “Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales” 2001, Valdivia, Universidad Austral de Chile, 9 p.
- InfoStat. 2008. Manual del Usuario, versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. Primera Edición, Editorial Brujas Argentina.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Summary for Policymakers. Paris, Francia. s.e. p 2.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Penman, J; Gytarsky, M; Hiraishi, T; Krug, T; Kruger, D; Pipatti, R; Buendia, L; Miwa, K; Ngara, T; Tanabe, K; Wagner, F. (Eds.). Tokio, Japon. pG12.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. Chapter 5: Land Use Change & Forestry. *Greenhouse Gas Inventory Reference Manual*. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Revised Version. London. vol. 3, 57 p.

- Juchasara, F. 2006. Evaluación de la capacidad de rebrote y selección del mejor individuo de tejeyeque posterior a una quema en la Colonia Israel "A", Trópico de Cochabamba. 76 Pág.
- Justiniano, M.J.; Pariana, W; Fredericksen, T.S; Nash, D. 2001. Ecología y silvicultura de especies menos conocidas –Serebo o Sombrerillo *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F.Blake, Caesalpiniaceae. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible BOLFOR. Santa Cruz, Bolivia. 37p.
- Kitteredge, J. 1944. Estimation of the amount of foliage of tree and stand. Journal of forestry. 42: 905 – 912.
- Kurbanow, E. 2000. Carbon Pine Forest Ecosystems of Middle Zavolgie, Russia. European Forest Institute, International Report N° 2. p 50.
- Labartê, F.A. 2005. Efecto de la tasa de crecimiento en las propiedades mecánicas de Lengua en un renoval en tierra del fuego. Tesis Ing. Forestal. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 84p.
- Lin, K.C; Ma, F.C; Tang, S.L. 2001. Allometric equations for predicting the aboveground biomass of tree species in the fushan forest. Taiwan J For Sci. 16 (3): 143 – 151.
- Loguercio, G; Defossé, G. 2001. Ecuaciones de biomasa aérea, factores de expansión y de reducción de la lenga *Nothofagus pumilio* (Poepp.et Endl.) Krasser, en el SO del Chubut, Argentina. (En línea). Consultado el 20 de octubre 2007. Disponible en <http://www.uach.cl/procarbono/simposio/trabajos/44%20-%20Loguercio.PDF>
- Mac Donald, D.J. 2005. Biomasa aérea en una plantación de *Austrocedrus chilensis* de 20 años ubicada en Valdivia. Tesis Ing. Forestal. UACH. Valdivia, Chile. 4 p.
- McNulty, S. 2002. Hurricane impacts on US forest carbon sequestration. Environmental pollution. 116: S17 – S24.
- Merino, A; Rey, C; Brañas, J; Rodríguez, R. 2003. Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Investigación agraria: Sistemas y recursos forestales. 12 (2): 85 – 98.
- Mostacedo, B; Justiniano, J; Toledo, M; Fredericksen, T. 2003. Guía dendrológica de especies forestales de Bolivia (2da edición). Proyecto BOLFOR. Santa Cruz, Bolivia. 247p.

- Monroy, C; Návar, J. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. Madera y Bosques. 10 (2): 29 – 43.
- Montero, M; Montagnini, F. 2005. Modelos alométricos para la estimación de biomasa de diez especies nativas en plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica. Recursos Naturales y Ambiente. 45: 112 – 119.
- Moret, A; Ortiz, A; Perez, Y; Quijada, M; Jerez, M. 2007. Ecuaciones de Volumen para árboles de Samán (*Samanea saman* (Jacq.)Merr.), provenientes de potreros en el Municipio Machiques de Pejirá, Estado Sulia, Venezuela. Revista Forestal Venezolana. 51 (1): 87 – 96.
- Moret, A; Jeres, M; Mora, A. 1998. Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.) en la unidad experimental de la reserva forestal Caparo, Estado Barinas – Venezuela. Revista Forestal Venezolana. 42 (1): 41 – 50.
- Moret, A; Ruíz, P. 1998. Determinación de ecuaciones de volumen para Mureillo (*Erisma uncinatum*) en la unidad C4 de la Reserva forestal Imataca, Bolívar – Venezuela. Revista Forestal Venezolana. 42 (2): 187 – 197.
- Muukkonen, P; Makipaa, P. 2006. Biomass equations for European trees: addendum. Silva Fennica. 40 (4): 763 – 773.
- Muñoz, T. 2001. Árboles fuera del bosque en Bolivia. Proyecto información y análisis para el manejo forestal sostenible: Integrando esfuerzos nacionales e internacionales en 13 países tropicales en América Latina. (en línea) Consultado el 30 de julio de 2008, disponible en http://www.zabalketa.org/documentos/tecnicos/manejo_forestal_sostenible.pdf
- Overman, J; Witte, H; Saldarriaga, J. 1994. Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest. Journal of Tropical Ecology. 10: 218 – 297.
- Peña, M.A. 2007. Correcciones de una imagen satelital ASTER para estimar parámetros vegetacionales en la cuenca del río Mirta, Aisén. Bosque. 28 (2): 162 – 172.
- Pereyra, O; Gelid, M. 2002. Estudio de la variabilidad de la densidad básica de la madera de *Pinus taeda* para plantaciones de Misiones y norte de Corrientes. Revista Floresta. 33 (1): 3 – 19.

- Posada, S.L.; Zoot, M.S.; Rosero, R. 2007. Comparación de modelos matemáticos: una aplicación en la evaluación de alimentos para animales. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 20: 141 – 148.
- Prodan, M; Peters, R; Cox, F; Real, P. 1997. *Mensura Forestal*. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. San José, Costa Rica, 561 p.
- Ramalho, P. 2008. Espécies arbóreas brasileiras. VOLUME II. (en línea). Consultado 29 de jul. 2008. Disponible en http://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/index_especies.htm
- Regina, S. 2000. Biomass estimation and nutrient pools in four *Quercus pyrenaica* in Sierra de Gata, Salamanca, Spain. *Forest Ecology Management*. 132: 127 – 141.
- Rojo, G; Jasso, J; Vargas J; Palma, D; Velázquez, A. 2005. Biomasa aérea en plantaciones comerciales de Hule (*Hevea brasiliensis* Mull. Erg.) en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencia*. 39 (4): 449 – 456.
- Rosas, M; Chacin, F; Garcia, J; Ascani, M; Cobo, M. 2007. Modelos de regresión lineal múltiple en presencia de variables cuantitativas y cualitativas para predecir el rendimiento estudiantil. *Revista de la Facultad de Agronomía – LUZ*. 23 (2): 1 – 20.
- Ruiz, A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 119 p.
- Saavedra, C.F. 2005. Cuantificación y distribución de biomasa aérea en una plantación de 5 años de *Eucalyptus nitens* (Maiden) con alternativas nutricionales en un suelo rojo arcilloso. Tesis Ing. Forestal. UACH. Valdivia, Chile. 5 p.
- Sandoval, E. 2006. Consideraciones económicas sobre plantaciones de Serebó. Documento científico Proyecto FOMABO No. 3 - 2006. Proyecto FOMABO, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. 41p.
- Schlegel, B; Gayoso, J; Guerra, J. 2002. Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile. s.e. 17p.
- Segura, M; Kanninen, M. 2005. Allometric Models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica*. 37 (1): 2 – 8.

- Segura, M. 1999. Valoración del servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados del Área de Conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 115 p.
- Slijepcevic, A. 2001. Loss of carbon during controlled regeneration burns in *Eucalyptus oblique*. Tasforests 13: 281-290.
- Solíz, B. 1998. Valoración económica de almacenamiento y fijación de carbono en un bosque sub húmedo estacional de Santa Cruz, Bolivia. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 113 p.
- Sprugel, D.G. 1983. Correcting for bias in log – transformed allometric equations. *Ecology*. 64: 209 – 210
- Suárez, D; Segura, M; Kanninen, M. 2004. Estimación de la biomasa aérea total en árboles de sombra y plantas de café en sistemas agroforestales en Matagalpa, Nicaragua, usando modelos alométricos. *Agroforestería en las Américas*. 41 – 42: 112 – 119.
- Torrez, H. 2005. Implementación de Parcelas Permanentes de Muestreo en Plantaciones Forestales para el Trópico de Cochabamba: Tesis Licenciatura en ingeniería forestal. Tarija - Bolivia. 84 Pág.
- UNC (Universidad Nacional de Colombia). 2003. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: contribuciones para la mitigación del cambio climático. Orrego S, S.A.; Valle A, J.I. del; Moreno H, F.H.; eds. Medellín, Colombia. p 87.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2004. Cuidar el clima. Ed. J Depledge; R Lamb. Bonn, Alemania. Courier-Druck GmbH. p 1.
- Vidal, A; Benítez, J; Rodríguez, J; Carlos, R; Gra, H. 2003. Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus caribaea* var. *Caribaea* en la E.F.I. La Palma de la provincia de Pinar del Río, Cuba. *Quebracho* 11: 60-66
- Watzlawick, L.F; Sanquetta, C.R; de Mello, A.A. 2001. Ecuaciones de biomasa aérea en plantaciones de *Araucaria angustifolia* en el sur del estado de Paraná, Brasil. Simposio “Medición y

Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales” 2001, Valdivia, Universidad Austral de Chile, 10 p.

Zianis, D; Muukkonen, P; Mäkipää, R; Mencuccini, M. 2005. Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe. *Silva Fennica Monographs* 4. 63 p.

ANEXOS

Anexo 1. Datos generales de las parcelas temporales en el trópico de Cochabamba

No	Municipio	Comunidad	Propietario	Especie	Tipo de plantación	Distanciamiento (m)	Edad (año)	Coordenadas UTM	
1	Villa Tunari	Central San Miguel	Elisa Pinto Villarroel	Serebó	Pura	5 x 6	13	246961	8127637
2	Villa Tunari	Gualberto Villarroel	Juan López	Tejeyeque	Pura	3 x 2,5	6,8	250057	8129764
3	Villa Tunari	General Román	Betty Sandoval	Tejeyeque	Pura	6 x 6	13	246914	8125931
4	Villa Tunari	General Román	Henry Torrico	Tejeyeque	Pura	5 x 5	7	245708	8125566
5	Villa Tunari	General Román	Henry Torrico	Serebó	Pura	5 x 5	7	245624	8125152
6	Villa Tunari	General Román	Edwin López	Serebó	Asoc. Con naranja	5 x 5	13	245160	8124363
7	Chimoré	Litoral	Albino Paniagua	Serebó	Pura	5 x 6	8,7	265712	8114709
8	Chimoré	Litoral	Albino Paniagua	Tejeyeque	Asoc. Con naranja	5 x 5,5	8,7	265705	8114733
9	Chimoré	Arenales	Gerónimo Antianti	Tejeyeque	Pura	3 x 3	3	265591	8108092
10	Chimoré	Arenales	Gerónimo Antianti	Tejeyeque	Pura	3 x 3	3	265505	8108093
11	Chinahota	Ibuelo	Vidal Paules	Tejeyeque	Pura	3 x 3	4,83	299922	8123431
12	Chinahota	Ibuelo	Augusto Carvallo	Serebó	Asoc. Con Palmito	3 x 3	4,83	250290	8122279
13	Chinahota	Ibuelo	Augusto Carvallo	Serebó	Asoc. Con Palmito	3 x 3	4,83	250293	8122635
14	Chinahota	Ibuelo	Augusto Carvallo	Tejeyeque	Asoc. Con Achiote	3 x 3	4,83	250185	8121981
15	Chimoré	Litoral	Wilson Villcarani	Tejeyeque	Asoc. Con cítrico	3,8 x 3,8	6	265072	8113798
16	Chimoré	Litoral	Wilson Villcarani	Tejeyeque	Pura	3,8 x 3,8	6	265083	8113749
17	Chimoré	Litoral	Roberto Vargas	Tejeyeque	Asoc. Con Palmito	3 x 3	5	267489	8118607
18	Chimoré	Cesarzama	Juan V. Aban Mamani	Serebó	Asoc. Con Palmito	5 x 5	9	279315	8119732
19	Chimoré	Cesarzama	Juan V. Aban Mamani	Serebó	Asoc. Con Palmito	5 x 5	9	279428	8119935
20	Chimoré	Curu Curichal	Vicente Quispe	Tejeyeque	Pura	3,5 x 4	9	278471	8119942

Anexo 1 (continuación). Datos generales de las parcelas temporales en el trópico de Cochabamba

No	Municipio	Comunidad	Propietario	Especie	Tipo de plantación	Distanciamiento (m)	Edad (año)	Coordenadas UTM	
21	Puerto Villarroel	Valle Ivirza	Gregorio Galindo	Tejeyequé	Asoc. Con Palmito	4 x 4	5	291723	8102303
22	Puerto Villarroel	Valle Ivirza	Gregorio Galindo	Tejeyequé	Asoc. Con Palmito	4 x 4	5	291620	8102348
23	Puerto Villarroel	Transversal	Tiburcio Mamani	Tejeyequé	Asoc. Con Palmito	4 x 4	8	297510	8107966
24	Puerto Villarroel	Transversal	Víctor Vásquez	Tejeyequé	Asoc. Con Palmito	3 x 3	8	298759	8107734
25	Chimoré		Genaro Muñoz	Tejeyequé	Pura	4 x 4		271733	8119691
26	Entre Ríos	Cooperativa Litoral	Hilarión Laura	Serebó	Pura	3 x 3	3	338855	8098518
27	Puerto Villarroel	Daza Ondarza	Victor Zurita	Serebó	Pura	5 x 5	7	313581	8106343
28	Puerto Villarroel	Israel A	Zenon Payno Flores	Tejeyequé	Asoc. Con Palmito	3 x 3	5	303262	8094467
29	Puerto Villarroel	Daza Ondarza	Margarita Salinas	Serebó	Asoc. Con Plátano	4 x 4	5	309157	8108672
30	Puerto Villarroel	Valle Ivirza	Julián Córdova	Serebó	Asoc. Con cítrico	8 x 8	14	296591	8106900
31	Puerto Villarroel	Simón Bolívar	Gerardo Parada	Serebó	Pura	3 x 3	4	294422	8097840
32	Puerto Villarroel	Simón Bolívar	Ezequiel Torrico	Serebó	Pura	3 x 3	4	293338	8097609
33	Chimoré	Suipacha Curichal "B"	Gerarda Rocha	Serebó	Pura	3 x 3	5	277943	8120059
34	Chimoré	Suipacha Curichal "B"	Zoraida Cureña	Serebó	Pura	3 x 3	5	277318	8120110

Anexo 2. Parcelas temporales e inventario de árboles (planilla de campo)

DATOS GENERALES

Responsable: Fecha:/...../..... No de parcela:

Municipio:.....Comunidad:

Propietario:..... Tipo de plantación:.....

Especie:..... Distanciamiento:..... Edad de la plantación:

Punto GPS: X..... Y.....

DATOS DE LOS ÁRBOLES

Nro.	cap (cm)	Calidad *
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		

Nro.	cap (cm)	Calidad *
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		

cap = Circunferencia a la altura del pecho; *Calidad de fuste de 1, 2 y 3

Observaciones.....

Anexo 3. Inventario de los componentes del árbol (planilla de campo)

DATOS GENERALES

Responsable:..... Fecha:...../...../..... No de parcela:

Nro. de árbol:

Especie	Edad (año)	dap (cm)	hc (m)	ht (m)

TOCÓN

Nro	Dap 1 (cm)	Dap 2 (cm)	Largo (m)	Vol. (cm ³)	Observaciones
1					
2					
3					

TROZAS (Fuste)

Nro.	dap 1 (cm)	dap 2 (cm)	Largo (cm)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Nro.	dap 1 (cm)	dap 2 (cm)	Largo (cm)
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

TROZAS (Ramas)

Nro	dap 1 (cm)	dap 2 (cm)	Largo (cm)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

Nro	dap 1 (cm)	dap 2 (cm)	Largo (cm)
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
Nro	Largo 1 (cm)	Largo 2 (cm)	Diferencia (cm)
1			
2			
3			
4			
5			
6			

PESO HÚMEDO (Hojas)

Nro	Ph (Kg)
1	
2	
3	
4	
5	

Nro	Ph (Kg)
6	
7	
8	
9	
10	

Nro	Ph (Kg)
11	
12	
13	
14	
15	

Anexo 4. Contenido de humedad y densidad básica de la madera (planilla de campo y laboratorio)

DATOS GENERALES

Responsable:..... Fecha:...../...../..... No de parcela.....

No de árbol:..... Especie:..... Laboratorio:

CONTENIDO DE HÚMEDO (Hojas)

Nro	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Contenido de humedad (%)
1			
2			
3			

DENSIDAD BÁSICA DE LA MADERA

Nro	Componente	A (mm)	E (mm)	L (mm)	Vv (cm ³)	Psh (g)	DB (g/cm ³)
1	Fuste						
2	Fuste						
3	Fuste						
4	Rama						
5	Rama						

A = Ancho

E = Espesor

L = Largo

Vv = Volumen verde

Psh = Peso seco al horno

DB = Densidad básica de la madera