

Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales



Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales

Marcos Rüginitz Tito

Mario Chacón León

Roberto Porro



Rügnitz, M. T.; Chacón, M. L.; Porro R. Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales -- 1. ed. -- Lima, Perú.: Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) / Consorcio Iniciativa Amazónica (IA). 2009. 79 p.

1. Medición de biomasa; 2. Cambio del uso de la tierra; 3. Carbono orgánico; 4. Ecuaciones alométricas; 5. Proyectos forestales; 6. Sistemas agroforestales.

La serie Manuales Técnicos sintetizan las implicancias prácticas y resultados de las investigaciones y de proyectos en el ámbito de la ciencia agroforestal que están aptos para ser diseminados. El Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) publica también otras series como Agroforestry Perspectives, Occasional Papers, y Working Papers.

© 2009 World Agroforestry Centre (ICRAF)

ICRAF Technical Manual no.11

World Agroforestry Centre – Amazon Regional Programme

Avenida La Molina 1895

Apartado 1558. Lima 12, Peru

Teléfono + 51.1.3496017, Fax +51.1.317.5326

E-mail: m.tito@cgiar.org

Website: <http://www.worldagroforestry.org/>

Para reflejar mejor su alcance global y una agenda que integra investigación y desarrollo, en 2002 nuestra institución pasó a ser designada como World Agroforestry Centre (Centro Mundial Agroforestal). La denominación de International Centre for Research in Agroforestry (Centro Internacional de Investigación Agroforestal) e ICRAF permanecen respectivamente como nuestro nombre legal y acrónimo.

ISBN: 978-92-9059-254-9

Revisor técnico: Álvaro Vallejo, Niro Higuhi, Lou Verchot, Julio Ugarte

Ilustraciones: Joao Henrique Lopes de Souza

Fotografías: Marcos Rugnitz Tito y Mario Chacon León

Colaboraciones fotográficas: Corporación Educativa para el Desarrollo Costarricense, Sociedad Civil –CEDECO (foto portada) y Experiencia del proyecto Enfoques Silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas, Grupo Ganadería y ambiente – CATIE.

Diseño gráfico: Milton Hidalgo

Se autoriza la reproducción de esta publicación con finalidades educativas y otros fines no comerciales sin el previo permiso escrito de quien tenga los derechos del autor con tal que se mencione la fuente. Se prohíbe la reproducción de esta publicación para venta o para otras finalidades comerciales sin el previo permiso escrito de quien tenga los derechos de autor.

El ICRAF certifica que, a su cabal saber y entender, la información presentada en esta publicación es veraz. Las recomendaciones y tecnologías explicadas deben considerarse como orientaciones que el usuario debe adaptar previamente a sus circunstancias específicas.

Esta publicación contó con recursos provenientes del apoyo financiero institucional proporcionado al ICRAF por los Gobiernos de Perú, Dinamarca, Irlanda, Holanda, Noruega, Suecia, Estados Unidos, y Finlandia, así como por la Mars Inc. La responsabilidad integral por el contenido presentado en esta publicación es de los autores.

INTRODUCCIÓN	ix
I. NOCIONES BÁSICAS SOBRE EL CICLO DEL CARBONO	1
II. PLANIFICACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE STOCKS DE CARBONO EN EL CAMPO	3
II.1. Definición del área de cobertura del proyecto	4
II.2. Estratificación del área del proyecto	6
II.3. Decisión sobre el depósito de carbono a medir	11
II.4. Determinación del tipo y número de parcelas de muestreo	13
II.4.a. Tipo de parcelas	14
II.4.b. Tamaño de la parcela.....	14
II.4.c. Pasos para determinar el número de parcelas	15
II.4.d. Pasos para definir la localización y la demarcación de los límites de las parcelas	18
II.5. Determinación de la frecuencia de mediciones	20
II.6. Precauciones a ser tomadas antes y durante la etapa de campo	21
II.6.a. Colecta y almacenamiento de las muestras	22
II.7. Medición de diámetro y altura de árboles	22
II.7.a. Medición del diámetro de árboles	22
II.7.b. Medición de altura de árboles	24
III. MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN DE BIOMASA SOBRE EL SUELO	28
III.1. Biomasa arbórea	28
III.1.a. Inventario de biomasa en plantaciones forestales	29
III.1.b. Inventario de biomasa forestal en barbecho, bosque natural y sistemas agroforestales	31
III.1.c. Inventario de árboles dispersos	33
III.1.d. Cálculo de stocks de carbono en la biomasa arbórea	34
III.2. Biomasa de vegetación no arbórea	35
III.3. Cálculo de stocks de carbono en la biomasa sobre el suelo	37
III.4. Material y equipos para medición de biomasa de vegetación arbórea y no arbórea	37
IV. MEDICIÓN DE BIOMASA SUBTERRÁNEA	39
IV.1. Biomasa de raíces arbóreas	39
IV.2. Biomasa de raíces de vegetación no arbórea	39

V. MEDICIÓN DE BIOMASA EN MATERIA ORGÁNICA MUERTA	41
V.1. Hojarasca y detritos	41
V.2. Troncos caídos, árboles muertos en pie y tocones mayores de 10 cm de diámetro.	41
VI. MEDICIÓN DE CARBONO EN EL SUELO	44
VI.1. Carbono orgánico	44
VI.1.a. Métodos de laboratorio para el análisis de carbono del suelo	44
VI.1.b. Método para el muestreo de suelo en campo	44
VI.1.c. Profundidad de muestreos	44
VI.1.d. Colecta de muestras para medición de carbono orgánico	45
VI.1.e. Colecta de muestras para medición de densidad aparente	46
VI.2. Biomasa de raíces finas	47
VI.2.a. Colecta de muestras para medición de biomasa de raíces finas	47
VI.3. Material y herramientas para medición de carbono orgánico y de raíces finas	48
VII. CÁLCULO DEL CARBONO DEL ÁREA DEL PROYECTO	49
VII.1. Cálculo de carbono para un determinado estrato	49
VII.2. Cálculo del incremento de carbono del proyecto	49
VII.3. Cálculo del carbono equivalente (CO ₂ e)	50
VIII. PROCEDIMIENTOS PARA SELECCIÓN Y GENERACIÓN DE Ecuaciones Alométricas de Biomasa	51
VIII.1. ¿Qué es una ecuación alométrica de biomasa?	51
VIII.2. ¿Qué tipos de ecuaciones alométricas existen?	52
VIII.3. ¿Cómo seleccionar una ecuación alométrica para estimar biomasa?	53
VIII.4. ¿Cómo desarrollar una ecuación alométrica?	55
VIII.4.a. Procedimientos para el desarrollo de una ecuación alométrica	55
VIII.4.b. Selección de árboles	56
VIII.4.c. Medición de variables	57
VIII.4.d. Corte de los árboles, separación de partes	57
VIII.4.e. Pesado de las partes	58
VIII.4.f. Secado en laboratorio	59
VIII.4.g. Determinación de biomasa seca	59
VIII.4.h. Generación de ecuación de biomasa	59
IX. RESUMEN	63
X. BIBLIOGRAFIA	65

XI. ANEXOS	71
Anexo 1. Cuadro de corrección de inclinación	71
Anexo 2. Formulario de Inventario forestal	72
Anexo 3. Formulario para colecta de información de biomasa aérea	73
Anexo 4. Ecuaciones Alométricas para especies agroforestales	74
Anexo 5. Programas de computación	75
Anexo 6. Transformaciones de ecuaciones alométricas	77
Anexo 7. Formato clinómetro de papel	79

Lista de Recuadros

Recuadro 1. Protocolo de Kioto y el Mecanismo de Desarrollo Limpio	ix
Recuadro 2. Relación Biomasa - C - CO ₂	3
Recuadro 3. Principios básicos del muestreo	7
Recuadro 4. Proyecto MDL F/R de pequeña escala	13
Recuadro 5. Relación entre número de parcelas y grado de precisión	16
Recuadro 6. Ejemplo de cálculo del número de parcelas requeridas	17
Recuadro 7. Cálculo de biomasa arbórea sobre el suelo utilizando ecuación alométrica genérica	29
Recuadro 8. Cálculo de stocks de carbono en la biomasa arbórea	34
Recuadro 9. Cálculo de stocks de carbono en vegetación no arbórea	36
Recuadro 10. Cálculo de stocks de carbono en la biomasa sobre el suelo	37
Recuadro 11. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa de bosques	39
Recuadro 12. Cálculo de stocks de carbono en la biomasa subterránea	40
Recuadro 13. Cálculo de stocks de carbono en troncos caídos	42
Recuadro 14. Cálculo de stocks de carbono en biomasa de materia orgánica muerta	43
Recuadro 15. Cálculo de carbono orgánico en el suelo	45
Recuadro 16. Cálculo para determinar densidad aparente del suelo	47
Recuadro 17. Índice de Valor de Importancia - IVI	56

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Descripción de los distintos tipos de depósitos de carbono	11
Cuadro 2. Matriz de recomendaciones de depósitos de carbono a medir, por tipo de proyecto	12
Cuadro 3. Ejemplo de formulario con identificación de muestras de suelo para orientar el análisis de laboratorio para determinar la densidad aparente utilizando calicatas	22
Cuadro 4. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa sobre el suelo (kg de materia seca por árbol) en plantaciones forestales comerciales (monocultivo)	30

Cuadro 5. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa sobre el suelo (kg de materia seca por árbol) en bosques naturales y barbechos	32
Cuadro 6. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa sobre el suelo (kg de materia seca por árbol) en árboles aislados (dispersos)	33
Cuadro 7. Equipo y cantidad de personal necesario para muestreo de biomasa sobre el suelo	37
Cuadro 8. Herramientas necesarias para realizar inventarios de carbono del suelo	48
Cuadro 9. Criterios de selección de ecuaciones alométricas	54
Cuadro 10. Parámetros estadísticos de selección de ecuaciones alométricas.....	61

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema del flujo de carbono	1
Figura 2. Flujo de carbono simplificado	3
Figura 3. Tipos de área del proyecto	5
Figura 4. Elaboración del mapa de forma conjunta con la comunidad	5
Figura 5. Elaboración del mapa durante el trayecto en campo	5
Figura 6. Ejemplo de imagen de satélite	6
Figura 7. Ejemplo de foto aérea	6
Figura 8. Ilustración de una muestra, unidad de muestreo, y población	7
Figura 9. Ilustración de población, muestra y unidad de muestreo utilizando como referencia un bosque	7
Figura 10. Representación gráfica de diferencias entre exactitud y precisión	9
Figura 11. Ejemplos de mapas de vegetación, suelos y aptitud agrícola de una determinada región	10
Figura 12. Ejemplo de estratificación de un proyecto	11
Figura 13. Representación de distribución aleatoria y sistemática	19
Figura 14. Equipos utilizados para demarcar los límites de las parcelas	20
Figura 15. Ejemplo de almacenamiento de muestras de suelo	22
Figura 16. Medición correcta de diámetro	23
Figura 17. Instrumentos de medición de diámetro	23
Figura 18. Medición del diámetro a la altura del pecho utilizando forcípula	24
Figura 19. Ilustración de diámetro y circunferencia	24
Figura 20. Medición con forcípula de un árbol de sección no-circular	24
Figura 21. Clinómetros e hipsómetros comerciales	25
Figura 22. Medición de la altura utilizando el clinómetro electrónico Vertex	25
Figura 23. Medición de la altura utilizando clinómetro de papel	25
Figura 24. Medición de distancia del árbol	26
Figura 25. Ilustración sobre corrección de inclinación	26
Figura 26. Observación y medición del ángulo a la base (pie) del árbol utilizando clinómetro de papel	27

Figura 27. Observación y medición del ángulo al ápice del árbol utilizando clinómetro de papel	27
Figura 28. Cálculo de las mediciones de altura	27
Figura 29. Ilustración sobre medición de altura	27
Figura 30. Corte de árbol en segmentos para medición de un fuste para desarrollo de ecuación alométrica	28
Figura 31. Plantaciones forestales comerciales de <i>Bombacopsis quinata</i> y <i>Tectona grandis</i>	29
Figura 32. Representación gráfica del formato de parcela para el inventario de barbechos, bosques y SAFs.....	31
Figura 33. Medición de altura y diámetro basal, plantación comercial de palmito (<i>Bactris gasipaes</i>), Costa Rica.....	33
Figura 34. Representación gráfica del formato de parcela circular para el inventario de árboles dispersos	33
Figura 35. Ejemplo ilustrativo de la forma de lanzar aleatoriamente el marco, y la forma de colectar vegetación herbácea y gramínea en campo.....	35
Figura 36. Barreno para raíces	40
Figura 37. Medición del diámetro del tronco.....	42
Figura 38. Diferentes tipos de barrenos	44
Figura 39. Parcela para muestreo de suelo	45
Figura 40. Secuencia de muestra tomada para densidad aparente en calicata	46
Figura 41. Proceso de tamizado y lavado de raíces finas en laboratorio	47
Figura 42. Materiales y herramientas para medición de carbono y raíces	48
Figura 43. Procedimientos para el desarrollo de ecuación alométrica	56
Figura 44. Medición del dap utilizando cinta diamétrica	57
Figura 45. Corte del árbol	58
Figura 46. Medición del tronco segmentado	58
Figura 47. Pesado de ramas cortadas	58
Figura 48. Línea de regresión y nube de puntos de pares de mediciones para la regresión alométrica simple $ht = f(dap)$ en los humedales de los bosques de guadua (bambú) en el delta del Río Patia, Pacífico sur colombiano.	60
Figura 49. Relación de la biomasa total por árbol y el dap de 300 árboles de un bosque de la reserva de biosfera Maya, Petén, Guatemala	62
Figura 50. Dispersión de los datos de biomasa aérea seca de cada componente y las curvas de los modelos seleccionados en función del dap para <i>Calophyllum brasiliense</i>	62
Figura 51. Procedimientos para la planificación de mediciones en campo	63

Figura 52. Diagrama de los procedimientos utilizados para la medición de biomasa y determinación de carbono en los componentes del sistema	64
Figura 53. Resultado gráfico de stocks de carbono en diferentes compartimientos	75
Figura 54. Módulo de Ecuaciones Silvia	75
Figura 55. Módulo selector de metodologías MDL aprobadas	76
Figura 56. Módulo financiero TARAM	76
Figura 57. Planilla para determinación de tamaño de muestras Winrock	77
Figura 58. La biomasa en función del diámetro y la altura, sin y con transformación logarítmica	77
Figura 59. Ejemplo de gráfico de dispersión de residuos sin y con anomalía	78

Lista de Acrónimos

- CE - Comercio de Emisiones
- CRE's - Certificados de Reducción de Emisiones
- CQNUMC - Convención-Cuadro de las Naciones Unidas sobre cambio del Clima
(United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC)
- GBP UTCUTS - Guía de Buenas Prácticas del Uso de la Tierra, Cambio del Uso de la Tierra y Silvicultura
- GEI - Gases de Efecto Invernadero (Greenhouse Gases - GHG)
- IA - Consorcio Iniciativa Amazónica
- IC - Implementación Conjunta
- ICRAF - Centro Mundial Agroforestal
- IPCC - Panel Intergubernamental sobre cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)
- MDL - Mecanismo de Desarrollo Limpio (Clean Development Mechanism - CDM)
- SIG - Sistemas de Información Geográfica

Intervenciones productivas que tengan como meta la captura de carbono tienen el potencial de contribuir con la generación de ingresos en comunidades rurales y de los productores familiares. Cuando son realizadas de forma correcta, estas acciones, además de contribuir a la mitigación de los efectos del cambio climático, deben promover el uso sostenible de los recursos naturales y un mayor bienestar de las comunidades rurales. Tales intervenciones ocurren por medio de la utilización de sistemas de uso de la tierra con mayor producción de biomasa, y que resultan en stocks más elevados de carbono. En efecto, agricultores familiares y comunidades tradicionales, pueden de hecho desempeñar un servicio ambiental por medio de actividades forestales y agroforestales que contribuyan con el almacenamiento de carbono. Sin embargo, los beneficios financieros recibidos por este segmento, resultantes del acceso a los mercados de carbono, hasta el momento han sido irrisorios.

Con la entrada en vigor del Protocolo de Kioto en 2005, el mercado internacional de carbono pasó a ser una realidad jurídica y práctica. Además del mercado asociado al cumplimiento del Protocolo de Kioto, otros mecanismos (voluntarios y paralelos) generan oportunidades para complementar ingresos provenientes de las actividades forestales por medio del ingreso derivado de los certificados de créditos de carbono. Entre tanto, las metodologías y procedimientos exigidos para comprobar la captura y almacenamiento del carbono por proyectos forestales son considerados restrictivos, siendo que la mayoría de estos mercados todavía no negocia certificados originados a partir de la reducción de emisiones por deforestación y degradación.

Recuadro 1. Protocolo de Kioto y el Mecanismo de Desarrollo Limpio

El Protocolo de Kioto es un tratado internacional en vigor desde 2005 que busca la reducción de la emisión de los Gases que provocan el Efecto de Invernadero (GEI, ver sección I). El Protocolo determina que países desarrollados (considerados Partes constituyentes del Anexo I) deben reducir por lo menos 5,2% de sus emisiones de GEI en relación a los niveles de 1990, en el periodo entre 2008 y 2012 (primer periodo de compromisos). Cada país signatario del Anexo I define sus metas individuales de reducción. Países en desarrollo como Brasil o Perú no pertenecen al Anexo I y, por lo tanto, no tienen la obligación de reducir sus emisiones de GEI.

Tres mecanismos de flexibilización auxilian a los países del Anexo I a cumplir sus metas de reducción previstas en el Protocolo: Implementación Conjunta (IC), Comercio de Emisiones (CE) y Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). De estos tres mecanismos¹, solamente el MDL tiene aplicación en países en desarrollo. Tal mecanismo permite que países parte del Anexo I puedan

financiar o desarrollar proyectos de reducción de GEI (eficiencia energética o secuestro de carbono) fuera de su territorio. Las reducciones de emisiones resultantes de la actividad del proyecto son contabilizadas en la forma de Certificados de Reducción de Emisiones (CREs)² y negociadas en mercados internacionales. Para esto, las reducciones de emisiones deben ser adicionales a las que ocurrirían en la ausencia de la actividad certificada del proyecto, y traer beneficios reales, medibles y de largo plazo, relacionados con la mitigación del cambio del clima. Además de reducir las emisiones de GEI, el MDL pretende promover la sostenibilidad en general, principalmente en los países en desarrollo.

Tales limitaciones para acceder a mercados de carbono se vuelven todavía mayores en el caso de pequeños y medianos productores rurales que desconocen el potencial para captura de carbono de sus áreas, así como las modalidades de proyectos, componentes elegibles para cada tipo de mercado y los procedimientos necesarios para negociar créditos de carbono en los respectivos mercados. En este sentido, se considera que los principales desafíos que limitan la adopción de intervenciones para viabilizar el acceso de agricultores y comunidades rurales a los mercados de carbono incluyen: (1) la necesidad de mecanismos para una correcta cuantificación y monitoreo de stocks de carbono; (2) el insuficiente conocimiento de técnicas y prácticas de manejo agroforestal y agroecológico; (3) políticas públicas inadecuadas para promover tales inversiones; (4) el tamaño mínimo recomendado para viabilizar financieramente un proyecto de carbono y la dificultad de agrupar pequeños productores en proyectos de escala adecuada; y (5) la inexistencia de instituciones y mecanismos que promuevan vínculos equitativos de estos productores con mercados de carbono.

La falta de acceso a métodos precisos y de bajo costo para la cuantificación y monitoreo de stocks de carbono de hecho constituyen uno de los principales obstáculos para la implementación de proyectos dirigidos a la inserción de comunidades de productores familiares en los mercados de carbono. Algunos de los reservorios de carbono en proyectos forestales y agroforestales son de medición difícil y costosa, como es el caso del suelo y de raíces arbóreas, lo que frecuentemente impide su utilización, resultando en la subestimación de los stocks. La mayoría de los métodos, además de ser caros y de demandar mucho tiempo, inclusive de técnicos calificados, fueron concebidos para situaciones de monocultivos forestales comerciales, o para pequeños lotes homogéneos individuales. En menor intensidad se han delineado métodos adecuados a las situaciones de extensos paisajes heterogéneos que caracterizan la agricultura familiar, particularmente en la Amazonía. Enfoques

¹ El Comercio de Emisiones y la Implementación Conjunta posibilitan a un país signatario del Anexo I contabilizar reducción de emisiones de otro país a través de compra venta de títulos generados por estas actividades, respectivamente, la Unidad de Reducción de Emisiones (ERU) o a Unidad Permitida de Reducciones (AAU).

² Un CRE corresponde a una tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente (CO₂e), calculada a partir de su contribución potencial al calentamiento global.

participativos para la cuantificación de stocks de carbono asociados con las técnicas eficaces en el monitoreo a escala de paisaje son necesarios para la reducción de los costos y para una mayor atracción de esta categoría de proyectos.

Teniendo en cuenta tales consideraciones, esta publicación representa un esfuerzo inicial para contribuir en la superación de este desafío, realizado por el Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) en el marco del Consorcio Iniciativa Amazónica. La publicación consiste en una guía práctica para técnicos y agentes de desarrollo involucrados en proyectos que promuevan la inserción de comunidades rurales y productores familiares en mercados de carbono, con énfasis en la región Amazónica. La publicación está basada en las recomendaciones de la Guía de Buenas Prácticas del Uso de la Tierra, Cambio del Uso de la Tierra y Silvicultura (GBP UTCUTS), en el Sourcebook para UTCUTS y Proyectos Forestales producidos por el BioCarbon Fund del Banco Mundial y Winrock, y en las experiencias de campo del Grupo Ganadería y Ambiente (CATIE). La guía presenta los procedimientos utilizados para la medición en campo de biomasa y carbono orgánico del suelo. Tales procedimientos son necesarios para la determinación de la situación inicial (línea de base) en cuanto a los stocks de carbono, así como para el monitoreo de los mismos a lo largo de la implementación de acciones direccionadas a la captura de carbono, comparándolos a la situación que ocurriría sin considerar la intervención del proyecto. Los procedimientos y protocolos presentados en este manual pueden ser posteriormente integrados a programas computacionales y utilización de sensores remotos que permitirán mayor rapidez y eficiencia en los procesos de monitoreo de carbono utilizados por agencias públicas e inversionistas privados.

La primera sección del manual presenta nociones básicas sobre el ciclo de carbono. En la segunda sección se describen los cinco procedimientos necesarios para la planificación de mediciones en campo de biomasa y carbono orgánico del suelo. Posteriormente, son presentados los procedimientos para la medición de las cinco modalidades de depósitos (reservorios) de carbono presentes en la biomasa sobre el suelo, materia orgánica muerta y materia orgánica del suelo. En la última sección se presenta los procedimientos para la selección y generación de ecuaciones alométricas de biomasa. En los anexos se proporcionan los formularios para registrar los datos de campo e indicaciones de programas computacionales de utilidad para proyectos que tengan como objetivo la obtención de certificados de crédito de carbono.

En este momento en que la utilización sostenible de áreas abiertas en la Amazonía adquiere carácter de urgencia, se espera que esta publicación pueda ser de uso efectivo para asociaciones de productores, comunidades y demás grupos informales involucrados en la búsqueda de alternativas agroforestales para la mejoría de su bienestar.

I. NOCIONES BÁSICAS SOBRE EL CICLO DEL CARBONO

El carbono es el elemento químico fundamental de los compuestos orgánicos, que circula por los océanos, la atmósfera, el suelo, y subsuelo. Estos son considerados depósitos (reservorios) de carbono. El carbono pasa de un depósito a otro por medio de procesos químicos, físicos y biológicos.

La atmósfera³ es el menor y el más dinámico de los reservorios del ciclo del carbono. Mientras tanto, todos los cambios que ocurren en este reservorio tienen una estrecha relación con los cambios del ciclo global de carbono (Figura 1) y del clima. Gran parte del carbono presente en la atmósfera ocurre en la forma de dióxido de carbono (CO_2 , también conocido como gas carbónico). En menor proporción, el carbono atmosférico se presenta en la forma de metano (CH_4), Perfluorocarbonos (PFCs) e Hidrofluorocarbonos (HFC). Todos estos son considerados Gases del Efecto de Invernadero (GEI)⁴, que contribuyen con el equilibrio térmico de la Tierra. Cualquier actividad relacionada al uso del suelo que modifique la cantidad de biomasa en la vegetación y en el suelo, tiene el potencial de alterar la cantidad de carbono almacenado y emitido hacia la atmósfera, lo que influye directamente en la dinámica del clima de la Tierra.

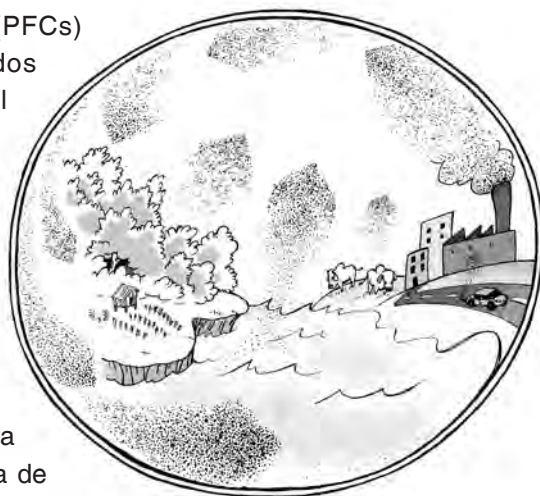


Figura 1. Esquema del flujo de carbono

³ La atmósfera es una capa constituida por varios gases que envuelve al planeta. Los principales gases son el nitrógeno (N_2) y el oxígeno (O_2) que juntos componen cerca de 99% de la atmósfera. Algunos otros gases se encuentran presentes en pequeñas cantidades, incluyendo los denominados Gases de Efecto Invernadero (GEI). Entre estos, están el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), Perfluorocarbonatos (PFCs), Hidrofluorocarbonos (HFC) y el hexafluoruro de azufre (SF_6).

⁴ El efecto invernadero es un proceso que ocurre cuando una parte de la radiación solar reflejada por la superficie terrestre es absorbida por determinados gases presentes en la atmósfera. Como consecuencia, el calor permanece retenido, no siendo liberado al espacio. El efecto invernadero es de vital importancia, ya que sin él el planeta se congelaría. Entre tanto, el exceso de la concentración de GEI causa el calentamiento global.

El intercambio de carbono entre el reservorio terrestre y el atmosférico es el resultado de procesos naturales de la fotosíntesis y respiración, y de la emisión de gases causada por la acción humana. La captura de carbono por medio de la fotosíntesis ocurre cuando las plantas absorben energía solar y CO_2 de la atmósfera, produciendo oxígeno e hidratos de carbono (azúcares como la glucosa), que sirven de base para su crecimiento. Por medio de este proceso las plantas fijan el carbono en la biomasa de la vegetación, y consecuentemente constituyen, junto con sus residuos (madera muerta y hojarasca), un stock natural de carbono. El proceso inverso ocurre con la emisión de carbono por medio de la respiración de las plantas, animales y por la descomposición orgánica (forma de respiración de las bacterias y hongos). A ésta se suman las emisiones de GEI debido a la deforestación, incendios, gases industriales y quema de combustibles: acciones antropogénicas que contribuyen con el desequilibrio del ciclo de carbono.

El carbono presente en el suelo está ampliamente relacionado al proceso de descomposición de la biomasa por las actividades bacterianas. Parte del carbono presente en el suelo regresa a la atmósfera a través del proceso de mineralización del carbono orgánico. De forma natural, otra parte del carbono orgánico es llevado por los ríos hasta llegar a los océanos, donde se deposita en forma de carbonatos (CO_3). Este proceso también puede ser acentuado por la acción humana. El cambio de carbono entre el reservorio oceánico y el atmosférico ocurre por medio de procesos químicos que establecen un equilibrio entre las capas superficiales de los océanos y las concentraciones en el aire sobre la superficie. La cantidad de CO_2 que el océano absorbe depende de la temperatura del mismo y de la concentración ya presente, de tal manera que temperaturas más altas del agua pueden causar la emisión de CO_2 .

II. PLANIFICACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE STOCKS DE CARBONO EN EL CAMPO

El inventario de biomasa es un requisito básico para desarrollar proyectos que tengan como objetivo la obtención de certificados de crédito de carbono. El inventario cuantifica el almacenamiento de carbono en diferentes depósitos⁵ presentes en distintos usos de ecosistemas de la tierra, permitiendo también medir el impacto de un determinado proyecto en la remoción (secuestro) del dióxido de carbono (CO₂) presente en la atmósfera, por medio de su fijación en la biomasa existente (Figura 2).

Recuadro 2. Relación Biomasa - C - CO₂

Una tonelada de carbono equivale a 3,67 toneladas (t) de CO₂ (obtenido en función de los pesos moleculares del carbono y del CO₂, de 12 / 44). Para saber la cantidad de CO₂ emitido o almacenado a partir de la cantidad de carbono de un determinado depósito, se debe multiplicar ésta por 3,67. A su vez, una tonelada de biomasa forestal posee aproximadamente 0,5 toneladas de carbono. Resumiendo:

1 t biomasa	+/- 0,5 t C
1 t C	3,67 t de CO₂



Figura 2. Flujo de carbono simplificado

Para realizar el inventario en el marco de un proyecto de carbono es necesario identificar una metodología que contemple el levantamiento del “escenario de referencia”, en el cual no se considera la intervención causada por el proyecto (también conocido como “línea de base⁶”), y las prácticas de monitoreo⁷. La metodología a

⁵ Los depósitos también son usualmente denominados reservorios

⁶ La línea de base puede ser entendida como el valor de referencia que permite determinar si el proyecto resultará en reducciones adicionales de emisiones de carbono, comparado con la ausencia de la actividad del proyecto propuesto. Para proyectos de conservación (deforestación evitada) la línea de base es definida como el área del proyecto en la cual el bosque está realmente amenazado en ser deforestado (basado en la definición del IPCC).

ser seleccionada debe estar de acuerdo con las exigencias del agente comprador (mercado) con el cual se pretende negociar los créditos de carbono, así como con las directrices y reglas nacionales e internacionales.

En esta sección serán presentados cinco procedimientos básicos recomendados por Pearson *et al.* (2005) necesarios para la planificación de mediciones en el campo de biomasa y carbono orgánico del suelo:

1. Definición del área de cobertura del proyecto;
2. Estratificación del área del proyecto;
3. Decisión sobre los depósitos de carbono a medir;
4. Determinación del tipo y número de parcelas de muestreo;
5. Determinación de la frecuencia de mediciones.

II.1. Definición del área de cobertura del proyecto

En términos generales, un proyecto con interés de obtención de certificados de crédito de carbono presenta tres posibilidades en cuanto a su área de cobertura: (a) puede ser una parte del área, o (b) el área total de una propiedad rural, o (c) parte o área total de un conjunto de propiedades, pudiendo ocurrir en áreas continuas o fraccionadas.

4

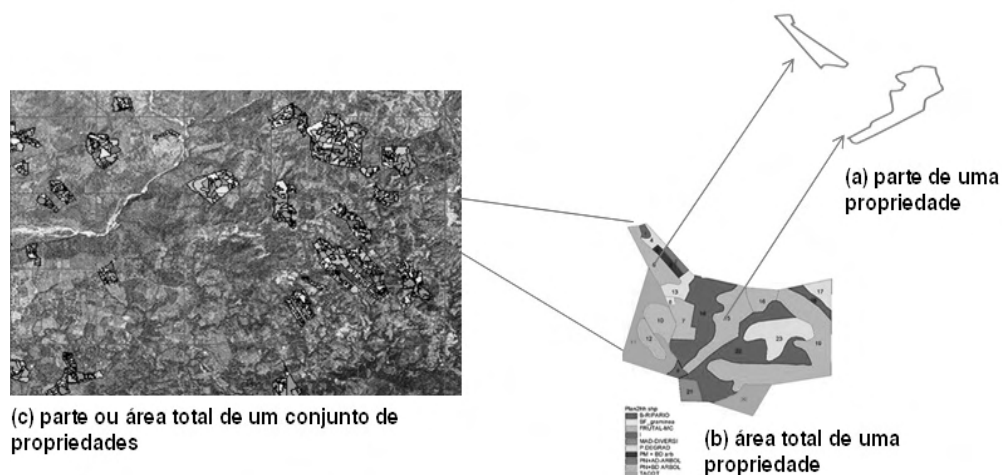


Figura 3. Tipos de área de proyecto

Fuente: Experiencia del proyecto Enfoques Silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas, CATIE.

⁷ El monitoreo es realizado a través de mediciones periódicas que evalúan y describen cambios en los diferentes componentes del proyecto.



Figura 4. Elaboración del mapa de forma conjunta con la comunidad
Fuente: Adaptado de Carvalheiro *et al.* 2008.

Para definir los límites de un determinado proyecto es necesario contar con mapas de las áreas donde se pretende establecer el mismo. En un primer momento, el mapeo puede ser realizado manualmente y de forma conjunta con los productores que serán beneficiados por el proyecto (Figura 4). También, puede ser realizado directamente en el campo (Figura 5).



Figura 5. Elaboración del mapa durante el trayecto en campo
Fuente: Experiencia del proyecto Enfoques Silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas, CATIE.

En una etapa posterior al mapeo realizado manualmente es necesario definir los límites (perímetro de cada área) por medio del georeferenciamiento, utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG⁸) y Cartografía, tales como equipamientos GPS⁹, interpretación de imágenes de satélites (Figura 6) y fotos aéreas (Figura 7).

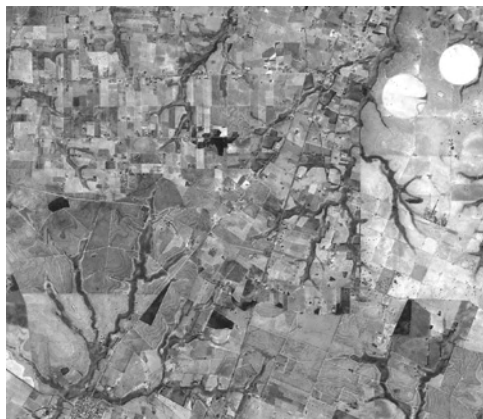


Figura 6. Ejemplo de imagen de satélite
Fuente: ENGESAT 2008



Figura 7. Ejemplo de foto aérea
Fuente: Embrapa Meio Ambiente 2008

II.2. Estratificación del área del proyecto

Las áreas de un proyecto son normalmente heterogéneas en términos de microclima, tipo y condición de uso del suelo, cobertura y estados de conservación y perturbación de la vegetación, lo que puede resultar en distintas cantidades de biomasa (stocks de carbono) para cada una de estas sub-áreas. De esta forma, es necesario estratificar el área del proyecto, permitiendo la expresión de tales diferencias. La estratificación, por definición de sub-áreas que representen la tipología existente de acuerdo con su participación proporcional, aumenta la exactitud y precisión del muestreo.

En algunas ocasiones, dependiendo de las exigencias del mercado de créditos de carbono (comprador, certificadora), así como del estado de diversificación de las propiedades, no será necesaria la estratificación de pequeñas unidades productivas, se realiza la estratificación a una escala de proyecto (ej. entre diferentes tipos de unidades productivas).

⁸ El Sistema de Información Geográfica (SIG) puede ser definido como un conjunto de módulos computacionales utilizados para coleccionar, almacenar, recuperar, transformar y presentar datos espaciales sobre el mundo real para un conjunto particular de objetos (Burrough 1986).

⁹ Sistema de Posicionamiento Global, vulgarmente conocido como GPS, por su sigla en inglés Global Positioning System.

Recuadro 3. Principios básicos del muestreo

Cuando se realiza la determinación del stock de carbono es prácticamente imposible medir toda la biomasa presente, sea por motivos de limitaciones de tiempo, recursos económicos o restricciones en el traslado para el registro de los datos

Por lo tanto, se recurre a la técnica de muestreo, donde un sistema pre-establecido de muestras es considerado idóneo para representar el universo investigado (población), con margen de error de muestreo aceptable (normalmente de +/- 10%, ver sección II.4.c.). De forma más sencilla, el muestreo es el proceso por el cual se obtiene información sobre un todo (población), únicamente examinando una parte del mismo (muestra). Se define muestra como un subconjunto de individuos, denominados unidades de muestreo, que presentan características comunes que identifican la población a la que pertenecen (Figura 8).

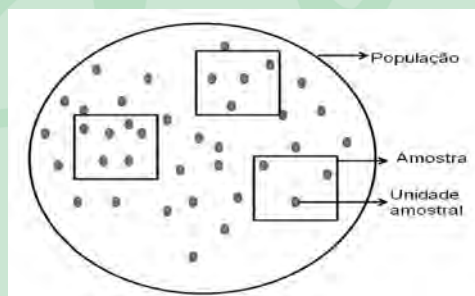


Figura 8. Ilustración de población, muestra y unidad de muestreo

Con esto, se define como población un conjunto de individuos que presentan determinadas características en común, localizados en una determinada área, en un espacio de tiempo definido para el estudio. En nuestro caso la población puede ser una unidad productiva (hacienda, chacra, etc.), un conjunto de estas o unidades de paisajes (bosque, plantación forestal, etc.). El muestreo proporciona medios para proyectar la información medida hasta el nivel geográfico seleccionado. Por ejemplo, la medición del carbono en la biomasa de árboles de un determinado bosque puede ser estimada a partir del inventario forestal utilizando un número limitado de parcelas de muestreo (Figura 9).

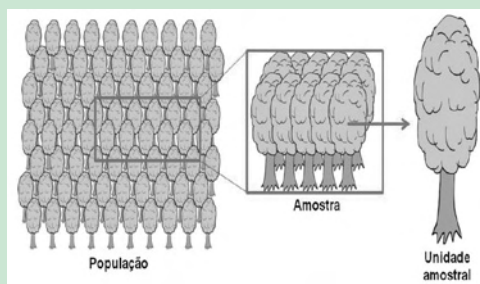


Figura 9. Ilustración de población, muestra y unidad de muestreo utilizando como referencia un bosque

Existen dos métodos para la obtención de la muestra, el probabilístico o no. En el muestreo probabilístico las unidades de muestreo son seleccionadas mediante mecanismos de sorteo. Así cada unidad de muestreo

posee una misma probabilidad de ser seleccionada. En cuanto en el muestreo no probabilístico la variabilidad de muestreo no puede ser establecida con precisión, debido a que no se conoce la probabilidad de cada unidad de muestreo de pertenecer a la muestra. Esto hace que algunas unidades de muestreo tengan probabilidad cercana a cero de pertenecer a la muestra. De forma general, se busca garantizar imparcialidad escogiendo los elementos que participarán de la muestra aleatoriamente, o sea, usando muestras probabilísticas. Para esto, debemos tener en consideración los tres tipos de muestreo probabilístico (aleatorio) tratados constantemente en esta guía: simple, sistemático y estratificado.

El muestreo aleatorio simple es el proceso más elemental y utilizado, donde cada elemento de la muestra es retirado aleatoriamente de la población (con o sin reposición), posibilitando que cada muestra tenga la misma probabilidad de ser seleccionada. Cuando los elementos de la población se presentan de forma ordenada, se utiliza el muestreo del tipo aleatorio sistemático. Este presenta características similares con el muestreo aleatorio simple, pero necesita de una lista de los elementos de la población, donde la selección de los elementos ocurre de forma sistemática y secuencial. Así, la selección de los elementos que constituirán la muestra puede ser hecha por un sistema impuesto por el productor. Cuando la población es heterogénea, como en el caso de una unidad productiva con diferentes tipos de uso del suelo, bosques o plantaciones forestales, se recomienda no usar el muestreo aleatorio simple para toda la población como tal, debido a la baja precisión de los estimados obtenidos. En este caso, se debe dividir la población de forma que dentro de las sub-poblaciones se tenga homogeneidad. Este proceso es denominado estratificación de la población, siendo considerada cada sub-población un estrato. La muestra obtenida en este caso, se llama muestra aleatoria estratificada. Esta técnica de muestreo usa información existente sobre la población para que el proceso de muestreo sea más eficiente.

La utilización de una muestra implica la aceptación de un margen de error, o error de muestreo, que es la diferencia entre la estimación calculada a partir de la muestra y el verdadero resultado poblacional. No se puede evitar la ocurrencia del error de muestreo, sin embargo, se puede limitar su valor a través de la selección de una muestra de tamaño adecuado. Cuanto mayor sea el tamaño de la muestra (sección II.4.b.), menor es el error cometido y viceversa. Entretanto, se puede evitar errores que ocurren principalmente cuando los datos de la muestra son colectados, registrados o analizados incorrectamente, o cuando se utiliza un instrumento defectuoso durante la realización de mediciones. En algunas situaciones no es posible medir una muestra (ej. depósito de carbono, ver sección II.3) con la exactitud y precisión (Figura 10) necesarias.

En lo posible, el establecimiento de las parcelas para realizar el muestreo debe ser exacto, preciso y conservador.

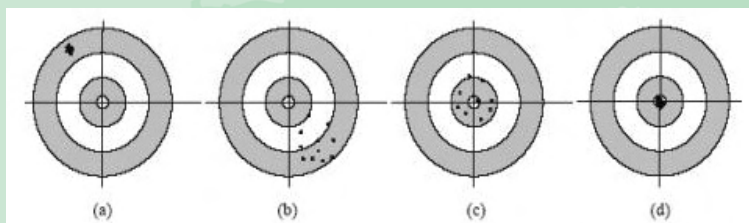


Figura 10. Representación gráfica de las diferencias entre exactitud y precisión
(a) Inexacto pero preciso; (b) Inexacto e impreciso; (c) Exacto pero impreciso; (d) Exacto y preciso
Fuente: IPCC 2006c

La estimación estadística del error tiene un nivel de confianza asociado que indica la probabilidad de que el valor verdadero (desconocido) se encuentre dentro de un margen, llamado intervalo de confianza¹⁰, generado al restar y sumar al valor promedio calculado el error estimado (Cardona 2004). En nuestro caso, es importante obtener valores de stock de carbono que representen con confianza la población, siendo aconsejable un abordaje conservador en cuanto al resultado final (Pearson *et al* 2005). Un abordaje conservador consiste en utilizar un intervalo de confianza menor que 95 % (ver sección II.4.c.), lo que resulta en un menor valor de carbono almacenado por el depósito medido.

La previa caracterización del área optimiza el trabajo de campo, proporcionando mayor agilidad, reduciendo los costos de mediciones, además de otorgar una mayor confianza en la presentación de los resultados. Por lo tanto, se recomienda realizar una pre-estratificación de acuerdo con los seis pasos siguientes:

Paso 1: Evaluar los factores esenciales que influyen los stocks de carbono en los reservorios que serán medidos (ver próxima sección). Siempre que sea posible, se recomienda que la definición de los estratos considere los siguientes factores: (a) áreas con similares prácticas de manejo e historial del uso del suelo, (b) características del suelo, (c) microclima, (d) relieve (por ejemplo, elevación, gradiente de inclinación), (e) especies de árboles existentes a ser plantados, (f) edad de la plantación, etc. La observación de estos factores es todavía más importante en el caso de proyectos que representen parte del área total de un conjunto de propiedades.

¹⁰ Para un mejor entendimiento del concepto utilizamos el ejemplo propuesto por Cardona (2004): en caso de que una medida de 100 m presentara una desviación estándar de 0,01 m, se puede confirmar con un nivel de confianza de 68% (si los datos se distribuyen como una normal) que el valor correcto se encuentra entre 99,99 y 100,01. Igualmente, con un nivel de confianza de 95%, que el mismo es mayor o igual que 99,98 y menor o igual que 100,02.

Paso 2: Colectar información local sobre los factores esenciales identificados en el paso anterior, considerando las siguientes variables:

- Tipo de uso del suelo (ej.: bosques, plantaciones forestales, sistemas agroforestales, cultivos, pasturas);
- Tipo de vegetación (ej.: especies, grupos ecológicos, etc.);
- Tipo de suelo y topografía (ej.: arcilloso o arenoso; ondulado o plano);
- Tipo de manejo agronómico del sistema (ej.: monocultivo o cultivo asociado);
- Historia del área (ej.: tiempo de uso del suelo, tipo de preparación, uso del fuego y fertilización). Cabe resaltar que las actividades humanas y otras perturbaciones alteran la dinámica del carbono en los suelos;
- Ocurrencia de áreas protegidas por ley (ej.: Área Natural Protegida), entre otras.

La utilización de mapas de límites del proyecto, así como mapas de la región (suelos, vegetación, clima, etc., Figura 11) son instrumentos fundamentales para la estratificación.



Figura 11. Ejemplos de mapas de vegetación, suelos y aptitud agrícola de una determinada región
Fuente: Embrapa Pantanal 2008

Paso 3: Estratificación preliminar: la estratificación debe ser conducida de forma jerárquica, dependiendo de la importancia de los factores esenciales en relación a los cambios en los stocks de carbono o del grado de diferencia de los factores esenciales en el área del proyecto. Solamente después de finalizada la estratificación en el nivel más alto es que se debe dar inicio a la estratificación en el nivel inferior siguiente.

Paso 4: Realizar un muestreo para cada estrato preliminar. Hay situaciones de proyectos en que áreas que a primera vista parecen ser homogéneas acaban por demostrar heterogeneidad cuando se realiza un análisis más detallado. Se debe analizar la variación de los factores esenciales investigados. En el caso de una variación grande dentro de cada estrato preliminar, se deben realizar investigaciones de campo más intensas y/o considerarse la realización de estratificaciones adicionales, como es mencionado en el próximo paso (5).

Paso 5: Conducir una estratificación adicional con referencia en las informaciones suplementarias obtenidas en el paso anterior (4), verificándose si cada estrato preliminar es suficientemente homogéneo, o si la diferencia entre los estratos preliminares es significativa.

Paso 6: Crear un mapa de estratificación del área (Figura 12). Finalmente, se debe considerar una corrección o post-estratificación luego de los resultados de las primeras mediciones de campo. La definición de los estratos solamente tendrá sentido si estos reducen los costos de muestreo y la complejidad del análisis. En este sentido, los estratos que no presenten grandes diferencias entre los factores esenciales, podrán ser agrupados.

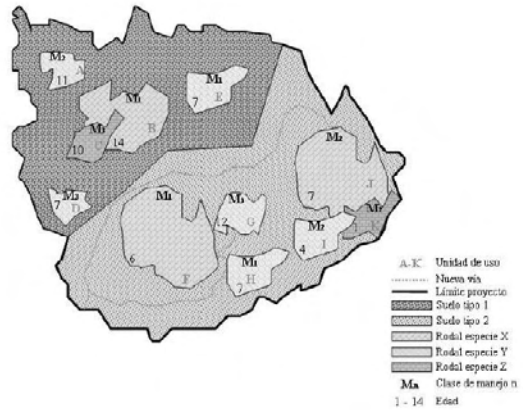


Figura 12. Ejemplo de estratificación de un proyecto
Fuente: Vallejo 2005

II.3. Decisión sobre el depósito de carbono a medir

De acuerdo con la Guía de Buenas Prácticas del Uso de la Tierra, cambio del Uso de la tierra y bosques (GBP UTCUTS) existen cinco tipos de depósitos de carbono que pueden ser medidos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de los distintos tipos de depósitos de carbono

Tipo de Depósito		Descripción
Biomasa viva	Biomasa sobre el suelo	Toda la biomasa viva que se encuentra sobre el suelo, incluyendo troncos, tocones vivos, ramas, cáscaras, semillas y hojas. Para facilitar las mediciones se evalúa por separado la biomasa aérea arbórea y la biomasa aérea no arbórea.
	Biomasa subterránea	Toda la biomasa de raíces vivas. Se excluyen raíces finas de menos de 2 mm de diámetro, porque difícilmente se distinguen de la materia orgánica del suelo
Materia orgánica muerta	Madera muerta	Toda biomasa forestal no viva: troncos caídos, árboles muertos en pie, y tocones mayores de 10 cm de diámetro.
	Hojarasca	Toda la biomasa no viva sobre el suelo (hojas, ramas y cáscaras de frutos) en diferentes estados de descomposición. Comprende las capas de detritos y humus. Se puede establecer previamente un diámetro mínimo para diferenciar de “madera muerta” (por ejemplo, 10 cm).

Tipo de Depósito		Descripción
Suelos	Materia orgánica del suelo	Comprende el carbono orgánico en los suelos minerales y orgánicos a una profundidad específica seleccionada por el proponente del proyecto.
		Raíces finas vivas con diámetro menor de 2 mm.

Fuente: IPCC 2005b

Algunas veces el costo de realizar el muestreo con el grado de precisión exigido o establecido es mayor que el retorno que se recibirá por el proyecto. Este es el caso, principalmente, de la evaluación de raíces y en algunos casos de la biomasa de la vegetación no arbórea. Siendo así, la decisión sobre cuál depósito de carbono medir dependerá del costo-beneficio de realizar los muestreos, estando de acuerdo con las exigencias del mercado en el cual se pretende negociar el proyecto.

Para facilitar la decisión, se presenta en el cuadro a seguir una adaptación de la matriz de decisión sobre los posibles criterios de selección de depósitos que deberán ser medidos y monitoreados, recomendados por la UTCUTS:

Cuadro 2. Matriz de recomendaciones de depósitos de carbono a medir por tipo de proyecto.

Objetivo del proyecto	Tipo de Proyecto	Tipo de depósitos de carbono					Suelo
		Biomasa viva			Biomasa muerta		
		Árboles	Vegetación no arbórea	Raíces	Madera muerta	Hojarasca	
Reducción (evitar) emisión de carbono	Conservación del bosque	S	T	R	T	S	R
	Manejo forestal sostenible	S	T	R	T	S	T
Reforestación (captura de carbono)	Restaurar vegetación nativa	S	T	R	S	S	T
	Plantaciones forestales	S	N	R	T	T	R
	Plantaciones agroforestales	S	S	T	S	S	R

Fuente: Modificado de Brown, 2002

S: Sí, necesario; R: recomendado; N: no recomendado; T: quizás, dependiendo de las exigencias del mercado

Para el caso de proyectos forestales en el ámbito del MDL, los participantes del proyecto pueden elegir no incluir uno o más reservorios de carbono dentro del límite del proyecto. En este caso se debe ofrecer información verificable y transparente, posible de ser replicada y auditable, asegurando que durante la implementación del proyecto no habrá una disminución de los stocks de carbono en esos reservorios.

Actualmente, existen tres metodologías de pequeña escala desarrolladas por el grupo de trabajo de forestación y reforestación (F/R) del CQNUMC que permiten la conversión de tierras a bosques por medio de actividades de reforestación: (1) en áreas de cultivos o pasturas, (2) en áreas de colonización humana; (3) en áreas inundables¹¹ (ej. pantanos). Debido a la necesidad de simplificación de las metodologías, en todos estos casos se considera únicamente la cuantificación del carbono en los depósitos de biomasa viva (sobre y bajo el suelo), no siendo considerado el carbono contenido por la materia orgánica muerta o en el suelo.

Recuadro 4. Proyecto MDL F/R de pequeña escala

Los proyectos MDL F/R de pequeña escala son proyectos que absorben hasta 16.000¹² toneladas de CO₂e/año (en promedio durante cinco años) y cuyas actividades son desarrolladas e implementadas por comunidades e individuos de bajos ingresos económicos. Las actividades de pequeña escala no pueden ser el resultado de la fragmentación de una actividad de gran escala.

Teniendo 16.000 toneladas de CO₂e/año como límite, un proyecto forestal de pequeña escala que estime una captura promedio de 10 toneladas de carbono por hectárea anual (equivalente a 36,7 ton CO₂e / ha/ año) deberá utilizar un área máxima de aproximadamente 436 hectáreas.

II.4. Determinación del tipo y número de parcelas de muestreo

La definición del tipo, número y dimensiones de las parcelas deberá estar de acuerdo con el tipo de uso del suelo (ej. vegetación) a ser muestreado, precisión demandada, naturaleza de las informaciones requeridas y costos de establecimiento y medición. Se recomienda un estudio preliminar sobre los costos necesarios para realizar todo el trabajo de campo, los análisis de laboratorio y elaboración de los informes. Este

¹¹ Incluyen tierras cubiertas (saturadas) por agua durante todo o parte del año y que no se clasifiquen en la categoría de bosques, agrícolas, pasturas o colonización humana. Son excluidas de esta categoría las áreas de cultivo de arroz (IPPC 2006).

¹² Redefinida durante 13ª. sesión de la Conferencia de las Partes (COP13/MOP3) realizada en Bali en diciembre de 2007.

estudio contribuirá para definir la intensidad del muestreo de acuerdo con los recursos disponibles. En un inventario de prospección de un bosque en el departamento de Minas Gerais, Brasil, Freitas *et al.* (2005) el costo estimado de la abertura de senderos y del inventario de prospección fue de US\$ 35,7/ha y US\$ 89,4/ha, respectivamente.

II.4.a. Tipo de parcelas

Como vimos anteriormente, realizar mediciones en toda el área se torna prácticamente inviable por cuestiones de tiempo, costo y confiabilidad de los resultados, y por lo tanto, se recurre a técnicas de muestreo. Así, para evaluar la cantidad de biomasa (carbono) en cada depósito seleccionado, también como estimar los cambios registrados en los respectivos depósitos a lo largo del tiempo, se pueden utilizar parcelas de muestreo del tipo temporal o permanente. Se considera muestreo temporal cuando las parcelas utilizadas en el segundo momento de medición son diferentes de la primera y, permanente cuando las parcelas seleccionadas en el primer momento son las mismas utilizadas (medidas) en el segundo y en los momentos siguientes (Silva 1984). En general, se considera que el uso de muestreo permanente es estadísticamente más eficiente. Parcelas permanentes son comúnmente utilizadas en inventario de especies arbóreas, cuando cada árbol es identificado y monitoreado (en cuánto al crecimiento y supervivencia) en el tiempo (años). Para otros tipos de depósitos usualmente se utilizan parcelas temporales. Por su parte, las parcelas temporales pueden presentar un menor costo de establecimiento.

Una desventaja de la utilización de las parcelas permanentes, ocurre cuando algunos técnicos y productores, al saber que las parcelas permanentes serán visitadas por los verificadores de las certificadoras, de forma casi natural, realizan un manejo diferenciado (mayor atención), proporcionando una mayor producción de biomasa, no representando la realidad del área total del proyecto.

Más detalles sobre los métodos de muestreo a utilizar serán presentados en las secciones metodológicas específicas a cada tipo de depósito

II.4.b. Tamaño de la parcela

El tamaño de parcela debe representar un equilibrio entre la exactitud, la precisión y el tiempo (costo) de la medición. Para el caso de mediciones del componente arbóreo, el tamaño de la parcela estará relacionado con la cantidad de árboles, diámetro y variancia del carbono almacenado entre las parcelas. Para plantaciones de tamaño uniforme generalmente se utiliza una parcela de área que varía entre 100 m² (para una densidad de siembra de aproximadamente 1.111 árboles/ha o más) hasta 1000 m² (para plantaciones de poca densidad, como plantaciones de uso múltiple). Entre tanto, cuanto menor es el tamaño de la parcela, mayor será el número de parcelas necesarias. Esta tendencia es confirmada por Higuchi *et al.* (1990) en su estudio

sobre el tamaño ideal de parcela de muestreo para inventarios de un bosque tropical húmedo. Según los autores, cuanto menor sea el número de parcelas menor será el tiempo del traslado de los trabajadores de campo y el establecimiento de parcelas. Entre tanto, el tiempo de medición por parcela será mayor. Para situaciones donde el acceso es difícil, la variable “tiempo de transporte hasta la parcela” asume importancia fundamental para la definición sobre el tamaño de la parcela. De acuerdo con Higuchi, utilizar el tamaño recomendado significa racionalizar el costo entre la inseguridad tolerable. Verificando la eficiencia de diversos tamaños y formas de parcelas en un muestreo aleatorio en el Bosque Nacional de Tapajós, Brasil, Silva (1980) presenta que para la variable volumen y para las condiciones del estudio, el tamaño de 2500 m² (50 X 50 m) fue más eficiente en relación a los demás tamaños evaluados. De acuerdo con Silva (1984), la metodología de inventario continuó siendo adoptada por la EMBRAPA Amazonia Oriental que utiliza parcelas de una hectárea para describir las características completas de los árboles individuales con dap superiores a 20 cm. Según el autor, este tamaño posibilita obtener información más precisa sobre árboles de tamaño intermedio que constituirán la próxima cosecha. Entre tanto, para estos casos se recomienda una división en subparcelas de 100 m² (10 X 10 m) para las mediciones de todos los árboles con diámetros iguales o mayores a 5 cm y menores a 20 cm. Basados en las experiencias del Programa de Alternativa al Corte y Quema del bosque (ASB, Alternatives to Slash e Burn), Hairiah *et al.* 2001, en su guía de métodos de muestreo de stock de carbono recomiendan parcelas rectangulares de 20 x 100 m (2000 m²) para la medición de árboles con dap superior a 30 cm, y subparcelas de 5 x 40 m (200 m²) para individuos menores con dap entre 5 a 30 cm.

A continuación, se presentan las etapas necesarias para determinar el número de parcelas y para definir la localización y demarcación de los límites de estas parcelas.

II.4.c. Pasos para determinar el número de parcelas

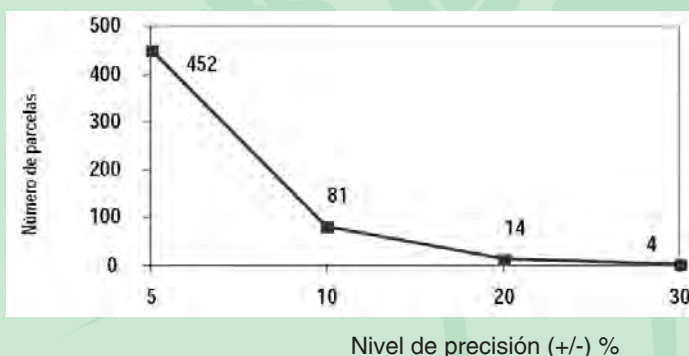
Paso 1. Seleccionar el nivel de precisión deseado

La selección del nivel de precisión está casi siempre relacionada con los recursos disponibles y con la exigencia del comprador (mercado). El nivel de precisión exigido tendrá un efecto directo sobre los costos del inventario. Usualmente, para proyectos forestales se utiliza un nivel de precisión (error de muestreo) de +/-10% del valor promedio de carbono a un nivel de confianza de 95%¹³. Sin embargo, proyectos del tipo MDL forestal en pequeña escala pueden utilizar un nivel de precisión de hasta +/- 20 % (Emmer 2007). Con todo, niveles de precisión específicos pueden ser definidos para cada tipo de componente del inventario.

¹³ Cuando el valor identificado es 80 t de C/ha, significa que para 95% de las situaciones en el universo muestreado, la cantidad de carbono almacenado estará entre 72 t (- 10%) y 88 t (+10%).

Recuadro 5. Relación entre número de parcelas y grado de precisión

La figura siguiente ilustra la relación entre el número de parcelas y el nivel (grado) de precisión (+/- % del carbono total almacenado en la biomasa viva y muerta, con 95% de confianza) para cuatro tipos de depósitos combinados (biomasa sobre el suelo, subterránea, hojarasca y materia orgánica del suelo) presentes en seis categorías de vegetación de un bosque tropical en Bolivia (Proyecto Piloto Noel Kempff). Para más información consultar Winrock International (1999).



Como se ilustra, para alcanzar un nivel de precisión de 5% serían necesarias 452 parcelas; en donde solamente 81 parcelas darían un nivel de precisión de 10%. Este ejemplo evidencia las implicaciones (costo-beneficio) de las exigencias de un mayor o menor nivel de precisión.

Fuente: IPCC 2003

Paso 2. Selección del área para la toma de datos preliminares

Antes de determinar el número de parcelas requeridas para la medición y monitoreo de carbono con determinado nivel de confianza, se debe obtener primero un estimado de la variancia existente para cada tipo de depósito (ej.: carbono en el suelo) en cada estrato. Dependiendo de la ocurrencia de un mismo estrato en el área del proyecto, cada estrato deberá tener muestras de más de un área (repetición), para que los resultados tengan validez estadística. Se recomienda inicialmente establecer de cuatro a ocho repeticiones para cada estrato.

Paso 3. Estimar el promedio, desviación estándar y variancia del stock de carbono de datos preliminares

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Promedio

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Varianza

$$s = \sqrt{s^2}$$

Desviación estándar

Paso 4. Cálculo del número de parcelas requeridas

Una vez conocida la varianza estimada en cada estrato, la superficie de cada estrato, el nivel de precisión deseado y el error del estimado (referenciado en el nivel de confianza seleccionado), se puede calcular el número de parcelas necesarias. La fórmula genérica para el cálculo del número de parcelas se presenta a continuación:

$$n = \frac{(N * s)^2}{\frac{N^2 * E^2}{t^2} + N * s^2}$$

Fórmula para un único estrato

$$n = \frac{(\sum_{h=1}^L N_h * s_h)^2}{\frac{N^2 * E^2}{t^2} + (\sum_{h=1}^L N_h * s_h^2)}$$

Fórmula para más de un estrato

Donde:

n = número de parcelas

E = error permitido (promedio x nivel de precisión seleccionado). Como fue visto en el paso anterior, el nivel de precisión recomendado es de $\pm 10\%$ (0,1) del promedio, pero puede llegar a $\pm 20\%$ (0,2).

t = muestra estadística de la distribución t para un nivel de 95% de confianza (generalmente se utiliza 2 como número de muestra)

N = número de parcelas en el área del estrato (área del estrato dividido por el tamaño de la parcela en ha)

s = desviación estándar del estrato h

Recuadro 6. Ejemplo de cálculo del número de parcelas requeridas

Por medio de muestreos preliminares de biomasa arbórea aérea utilizando parcelas de 20 X 20 m, se determinaron los siguientes valores:

Área de estudio = 10.000 ha

Área de la parcela = 0,04 ha (20 X 20 m)

Promedio de stock de carbono = 120,3 tC/ha

Desviación estándar del estrato (s) = 18,1 tC/ha

Muestra estadística de la distribución t = 2

Nivel de precisión seleccionado = 10% (0,1)

Con esta información se puede calcular el área del estrato (N) y el error permitido (E):

Área del estrato (N) (área del estrato x tamaño de la parcela en ha = 10.000/0,04) = 250.000

Error permitido (E) (promedio x nivel de precisión seleccionado): 120,3 x 0,1 = 12,3

Finalmente se calculó el número de parcelas requeridas para muestra el estrato:

$$n = \frac{(N * s)^2}{\frac{N^2 * E^2}{t^2} + N * s^2} = \frac{(250.000 * 18,1)^2}{\frac{250.000^2 * 12,3^2}{2^2} + 250.000 * 18,1^2} = 28 \text{ parcelas}$$

Fuente: Adaptado de Person *et al*/2005

La guía UTCUTS recomienda establecer 10% a más de parcelas que la cantidad determinada (calculada), como precaución contra imprevistos futuros que puedan impedir la localización de alguna de las parcelas.

Para facilitar la determinación de números de parcelas requeridas, la organización Winrock International, desarrolló la herramienta Excel denominada “Winrock Terrestrial Sampling Calculator”. Para más detalles sobre la herramienta ver Anexo 5.4.

II.4.d. Pasos para definir la localización y la demarcación de los límites de las parcelas

Paso 1. Preparar el mapa del proyecto con los límites (divisiones internas y externas) y sus estratos bien definidos

Establecer la distancia recomendada del límite del área del proyecto para evitar interferencia de otras actividades (más conocido como efecto de borde). Es importante conocer el histórico de uso de la tierra del local donde se establecerá la parcela, evitando situar las parcelas en localidades en que el uso del suelo anterior fue totalmente atípico al restante del área del estrato (ej.: debido a la acumulación de fertilizante).

Paso 2. Decidir si las parcelas serán distribuidas de forma aleatoria simple o sistemática

La localización de las parcelas puede ser realizada por medio de la selección aleatoria simple o sistemática de las localidades. Como ya sabemos, el muestreo aleatorio simple requiere que todas las combinaciones posibles de la parcela tengan igual posibilidad de ser muestreadas, siendo que la selección debe ser libre de cualquier elección y totalmente independiente de la selección de las demás parcelas (Ambiente Brasil 2008). Prodan y Peters (1997) recomiendan la utilización del muestreo aleatorio simple cuando ningún otro tipo de diseño de muestreo garantice estimaciones más exactas y precisas (ver figura 10). El muestreo sistemático consiste en la selección de parcelas a partir de un esquema rígido y pre-establecido de sistematización, con el propósito de cubrir toda el área del proyecto.

En algunos casos específicos la localización de las parcelas puede ser más fácil con una distribución de muestreo sistemático que en una aleatoria, debido a que las unidades son distribuidas según una orientación previamente determinada.

Silva (1984) relata que el proceso sistemático puede, muchas veces, sobreestimar el error de muestreo, pero posibilita una estimación del promedio próximo del valor verdadero, ya que detecta la mayor parte de la variación poblacional.

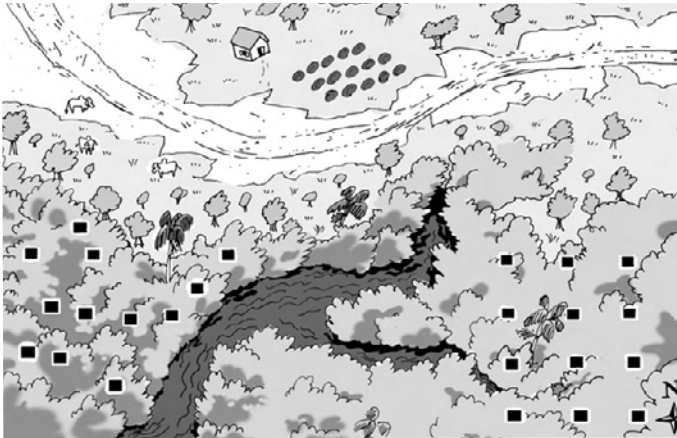


Figura 13.
Representación de
distribución aleatoria
(lado izquierdo) y
sistemática (lado
derecho)

Paso 3. Selección de los sitios específicos para cada parcela

La localización de las parcelas debe ser realizada inicialmente en el mapa del área o del estrato y en seguida en el área. Se divide el mapa en cuadrantes o polígonos, asignando un número para cada uno de estos. Para la selección aleatoria simple de la ubicación de una parcela, se debe realizar un sorteo entre los números que representan a las parcelas. También se puede realizar la localización directamente en campo, como es el caso del muestreo de la vegetación de arbustos de pequeño porte, en el cual el proceso consiste en lanzar el marco utilizado para demarcar la parcela en forma aleatoria. En caso esta metodología no sea adecuadamente empleada en campo, respetando los criterios de probabilidad, esta puede pasar a ser considerada un tipo de muestreo no aleatorio por no permitir que todas las parcelas tengan la misma probabilidad de ser seleccionadas. La selección aleatoria sistemática consiste en localizar parcelas con un estándar definido dentro del área. Esta metodología es comúnmente utilizada por empresas forestales. Para el caso de muestreos sistemáticos que no sean predefinidos utilizando el mapa, se recomienda que las parcelas sean ubicadas de forma ordenada a partir de un primero punto determinado al azar (aleatorio). El objetivo es evitar la selección de las mejores áreas (lugares más convenientes) para ubicación de las parcelas.

De acuerdo con la metodología forestal AR-AM0001 (“Reforestación de Tierras Degradadas”), se debe asegurar que las parcelas de muestreo están distribuidas de la forma más uniforme posible. Por ejemplo, si un estrato consiste en más de dos áreas geográficamente separadas, se propone que:

- el área total del estrato sea dividida por el número de parcelas, obteniendo el área promedio por parcela;
- la extensión de cada área sea dividida por esa área promedio por parcela, y la parte entera del resultado atribuida a esta área. Por ejemplo, si la división resulta en 6,3 parcelas, entonces 6 parcelas son atribuidas a esta área, la fracción 0,3 se pasa para la próxima área y así sucesivamente.

Aquellos que posean o tengan acceso a un aparato receptor de GPS (Sistema de Posicionamiento Global) se recomienda utilizar esta herramienta para facilitar la localización y el establecimiento de cada parcela. Entre tanto, la demarcación de las parcelas no deberá ser realizada utilizando el receptor de GPS, porque aumentará en mucho el tiempo estimado para la colecta de información.

Paso 4. Demarcación de los límites de las parcelas

Independiente del tipo (aleatoria, sistemática, temporal o permanente) cada parcela deberá ser georeferenciada con GPS en uno de los vértices previamente definido, y correctamente demarcada y señalizada¹⁴ para favorecer su localización durante el periodo (años) de monitoreo. Para el caso de parcelas permanentes rectangulares (comúnmente utilizadas en inventarios de plantaciones forestales), se recomienda fijar tubos de PVC o estacas de madera resistente (de 0,5 a 1,0 m de largo) en los cuatro vértices de la parcela. Luego de establecido el primer vértice de forma aleatoria, los demás vértices serán localizados utilizando una brújula (figura 14 b, c, d) para orientar cada vértice y una cinta métrica (Figura 14 a) para medir las distancias entre los vértices.



a. Cinta Métrica



c. Brújula ranger
Silva



b. Brújula
Brunton



d. Brújula Digital
Noma

Figura 14. Equipos utilizados para demarcar los límites de las parcelas
Fuente: Terra Ges 2008

Paso 5. Definición de los criterios de inclusión

Se recomienda que todo árbol cuya posición planificada se encuentre dentro de la parcela establecida sea incluido como dentro de la parcela, así parte del fuste y la copa queden fuera. Si el fuste y la copa estuvieran dentro de la parcela, pero la posición planificada se encuentra fuera de la parcela, el árbol no será incluido.

II.5. Determinación de la frecuencia de mediciones

La frecuencia de muestreo será determinada por el objetivo (ej. investigación o venta de crédito de carbono) y tipo de proyecto (ej. forestal o agroforestal), tipo de

¹⁴ Sin embargo, las metodologías MDL recomiendan usar una demarcación discreta, para que el personal del proyecto no realice en las parcelas un tratamiento o manejo diferente de las demás áreas.

componente muestreado, tipo de manejo (ej. periodos de raleo y corte), velocidad y magnitud del cambio en el stock de carbono, y exigencia del comprador de crédito. Generalmente los muestreos son realizados durante la etapa de verificación para la venta del crédito (temporal) de carbono. Ésta generalmente es realizada cada cinco años luego del inicio de la implementación del proyecto.

Para el caso de proyectos con finalidad de investigación, para generar modelos de crecimiento y ecuaciones alométricas para una determinada especie forestal, se recomienda medir la biomasa viva aérea en intervalos de uno (principalmente en los primeros 10 años) a cinco años (edades más avanzadas, donde el crecimiento no es tan significativo).

Para procesos más lentos o estables de acumulación de carbono (caso del carbono en el suelo) y principalmente cuando los costos de mediciones de campo son elevados, el intervalo de muestreo puede ser superior a cinco años. Para estos tipos de reservorios se recomienda solamente la medición al establecimiento del proyecto y en la última verificación.

II.6. Precauciones a ser tomadas antes y durante la etapa de campo

- El proceso de mediciones en campo solamente debe ocurrir cuando estuvieran bien definidos los objetivos y los aspectos administrativos y logísticos del proyecto y cuando su ejecución es requerida por razones técnicas o normativas.
- Se recomienda establecer un cronograma de campo adecuado a la etapa de análisis de datos, evitando almacenar muestras de suelo, raíces y hojarasca mucho tiempo antes de enviar al laboratorio.
- Usualmente se utilizan programas como Excel y/o Access para componer la base de datos.
- El equipo de campo debe ser debidamente entrenado, tanto para recoger la información como para manipular las muestras, teniendo pleno conocimiento de todos los procedimientos necesarios, y principalmente, de la importancia de coleccionar datos con la mayor precisión posible.
- Se recomienda instalar parcelas de prueba (pre-prueba) midiendo todos los componentes seleccionados.
- Se recomienda evitar al máximo el cambio de los miembros del equipo, principalmente los responsables del levantamiento de información subjetiva, como es el caso de la medición de altura de especies forestales.
- Se debe evitar tomar muestras en distintos periodos del año, reduciendo así variaciones estacionales.
- Finalmente, se debe tener en consideración que los mapas del área y el uso de GPS son indispensables.

II.6.a. Colecta y almacenamiento de las muestras

Cada muestra retirada debe ser colocada en un saco adecuadamente etiquetado (identificado). La etiqueta debe poseer un número específico para cada muestra. A su vez, esta identificación debe coincidir con los datos de origen de la muestra y describir el tipo de análisis a realizar. Esta información es registrada en un formulario de campo, enviado junto con las muestras al laboratorio.



Figura 15. Ejemplo de almacenamiento de muestras de suelo

El formulario (cuadro 3) debe contener las siguientes informaciones:

- Número correlativo de la etiqueta del saco;
- Nombre o código de la propiedad;
- Tipo de muestra (ej. hojarasca; densidad aparente del suelo, raíces, etc.);
- Profundidad de la muestra (solo para el caso de raíces y suelo);
- Código del tipo de estrato;
- Número de la repetición;
- Código del tipo de la parcela.

Cuadro 3. Ejemplo de formulario con identificación de muestras de suelo para orientar el análisis de laboratorio para determinar la densidad aparente utilizando calicatas

# Etiqueta del saco	Tipo de análisis	Profundidad	#Calicata	Repetición	Estrato	Propiedad	Código parcela
900	Densidad	0-10	1	3	Bosque	William Madrigal	309
901	Densidad	10-20	1	3	Bosque	William Madrigal	309
902	Químico	0-10	1	3	Bosque	William Madrigal	309
903	Químico	10-20	1	3	Bosque	William Madrigal	309

II.7. Medición de diámetro y altura de árboles

Previo a la descripción de los procedimientos necesarios para la cuantificación y el monitoreo de biomasa en campo, se presenta a continuación algunas instrucciones básicas para la medición de diámetro y altura de los árboles.

II.7.a. Medición del diámetro de árboles

El diámetro de los árboles es medido con la corteza, a la altura del pecho (1,3 m), este diámetro se denomina dap. La excepción son los casos particulares presentados en la Figura 16. La medición puede ser realizada con cinta diamétrica (cinta flexible usada para medir la circunferencia, proporcionando el resultado directamente en unidades de diámetro en centímetros) (Figura 17 a) o con uso de una forcípula (Figuras 17 b, c). En algunos casos, principalmente para investigación, se utilizan equipos específicos como el dendrómetro de cinta¹⁵ (Figura 17 d).

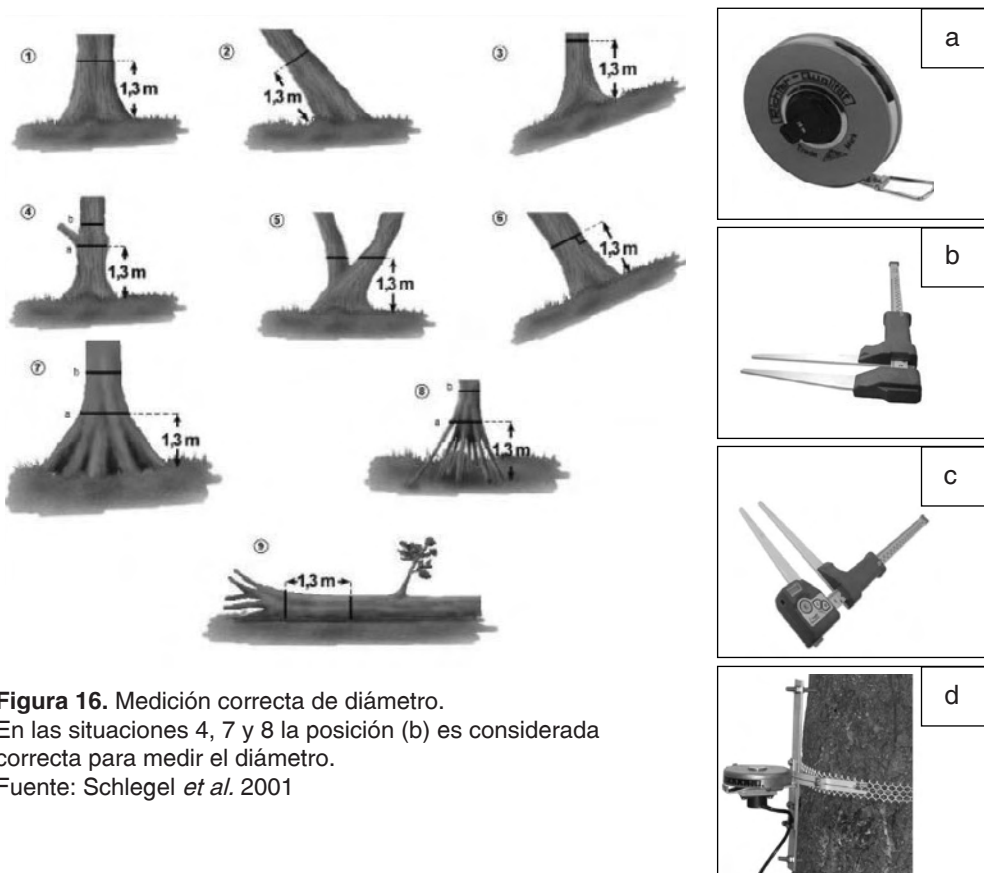


Figura 16. Medición correcta de diámetro.

En las situaciones 4, 7 y 8 la posición (b) es considerada correcta para medir el diámetro.

Fuente: Schlegel *et al.* 2001

Figura 17. Instrumentos de medición de diámetro:
a. Cinta de diámetro; b. Forcípula de medición;
c. Forcípula de medición digital; d. Dendrómetro de cinta
Fuente: Terra Ges 2008

¹⁵ Los dendrómetros de cinta son equipos de precisión que sirven para determinar los periodos de crecimiento de los diferentes árboles y consisten en micrómetros que miden los árboles mediante una cinta de metal y cuyo funcionamiento es semejante al de una cinta de diámetro que está permanentemente en el fuste.



Figura 18. Ilustración de medición del diámetro a la altura del pecho utilizando forcípula en un individuo de pequeño porte

De no existir la posibilidad de adquirir una cinta diamétrica o forcípula, la opción es medir el diámetro utilizando una cinta métrica convencional (utilizada por las costureras). En el caso de usar esta cinta, se debe convertir el valor de la circunferencia al diámetro (Figura 19).

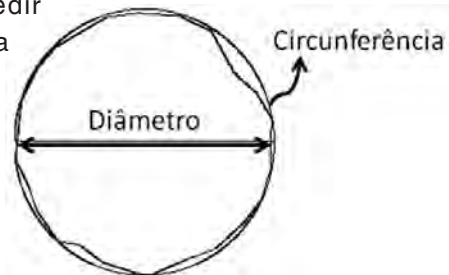


Figura 19. Ilustración de diámetro y circunferencia

Esa conversión es hecha por medio de la división de la circunferencia por el

$$\pi (\text{PI})^{16}: D = C / \pi$$

Donde:

D es el diámetro

C es la circunferencia y

π (PI) equivale a 3.1415

En caso se utilice la forcípula para árboles con perímetros diamétricos no circulares (Figura 20) se deben medir los dos diámetros perpendiculares y representativos, sumarlos y después dividir entre dos.

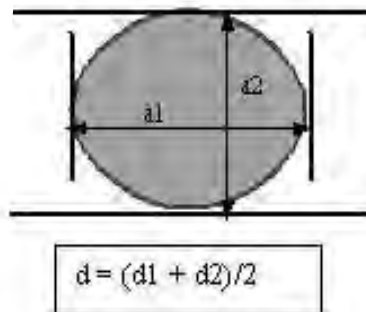


Figura 20. Medición con forcípula de un árbol de sección no-circular

Fuente: FAO 2004

¹⁶ En matemáticas, π (pi) es el número que representa el cociente entre el perímetro de una circunferencia y su diámetro. Entienda mejor el valor π asistiendo el vídeo: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/PI-unrolled_slow.gif


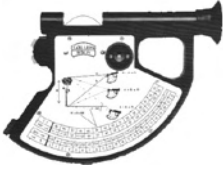


			
a. Clinómetro Suunto	b. Hipsómetro Blume-Leiss	c. Clinómetro Electrónico Haglöf	d. Hipsómetro Vertex.
Instrumentos Manuales		Instrumentos Digitales	

Figura 21. Clinómetros e hipsómetros comerciales

Fuente: Terra Ges 2008

II.7.b. Medición de altura de árboles

La medición de la altura de los árboles se realiza por medio de aparatos como clinómetros (Figuras 21 a, c) e hipsómetros (Figuras 21 b, d). Los clinómetros son instrumentos utilizados para medir altura e inclinación y generalmente requieren de una cinta métrica para establecer la distancia entre el árbol y la persona que realiza la medición. Los hipsómetros son instrumentos utilizados específicamente para medir alturas de objetos. La mayoría de los hipsómetros reemplaza la utilización de la cinta métrica, para la medición de la distancia, con medios ópticos.

En algunos casos, los instrumentos digitales presentan resultados de medición de alturas y ángulos directamente en la pantalla del equipo, eliminando cualquier riesgo de error de cálculo. Dos ejemplos de este tipo de instrumento son el Clinómetro Electrónico Haglöf (Figura 21 c) y el Hipsómetro Vertex (Figura 21 d). La Figura 22, ilustra la medición utilizando el clinómetro electrónico Vertex.



Figura 22. Medición de la altura utilizando el clinómetro electrónico Vertex

Fuente: Experiencia del proyecto Enfoques Silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas, CATIE.



Figura 23. Medición de la altura utilizando un clinómetro de papel



Figura 24. Medición de la distancia del árbol

Paso 2. Corrección de la inclinación del terreno (Figura 25, puntos a, b). Se debe obtener la distancia horizontal del árbol seleccionado a pesar del grado de inclinación del terreno (ej. 20 m). Cuando el terreno es plano, las distancias pueden ser medidas directamente. Entre tanto, si el terreno es inclinado ($\geq 15\%$), se recomienda aplicar un factor de corrección.

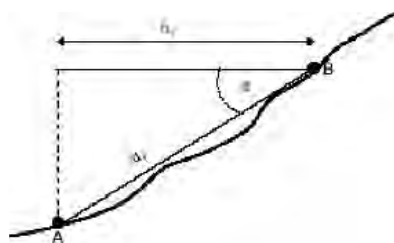


Figura 25. Ilustración sobre corrección de inclinación

La distancia entre dos puntos, medida en un terreno inclinado (d_1) siempre será mayor que la distancia horizontal equivalente (h_1). De esta forma, para obtener la distancia correcta, la distancia horizontal debe ser multiplicada por un factor

De no existir la posibilidad de adquirir instrumentos comerciales, la opción es construir un clinómetro. Existen algunas formas de clinómetros artesanales¹⁷, entre estas el clinómetro de papel (Figura 23) construido utilizando un transportador. En el anexo 7 se presenta un formato de clinómetro de papel que puede ser utilizado para medición de la altura de árboles.

Pasos para determinar la altura de los árboles

Paso 1. Tomar una distancia suficiente del árbol a ser medido (de 15 a 40 metros, dependiendo de la escala del instrumento y de la visibilidad total que se tiene de la parte superior del árbol). Realizar la medición de la distancia (Figura 24). Para reducir errores de medición, la distancia debe ser aproximadamente equivalente a la altura del árbol a ser medido. El responsable en registrar los datos deberá posicionarse en la base del árbol. El otro miembro del equipo debe posicionarse a una distancia definida para realizar los próximos pasos.

¹⁷ Otro instrumento artesanal es el clinómetro de madera. Los procedimientos para la construcción de un clinómetro de madera pueden ser encontrados en el sitio Web: http://hilaroad.com/camp/projects/clinometer/clinometer_use.html.

Paso 3. Observación y medición de la base del árbol (Figura 26).

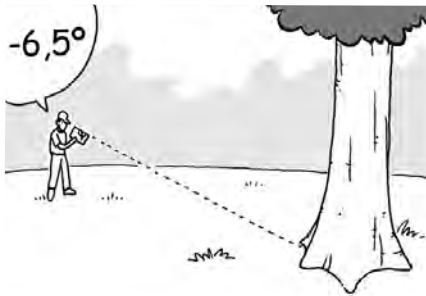


Figura 26. Observación y medición del ángulo a la base (pie) del árbol utilizando el clinómetro de papel

Paso 4. Observación y medición del ápice (o de la altura comercial) del árbol (Figura 27).

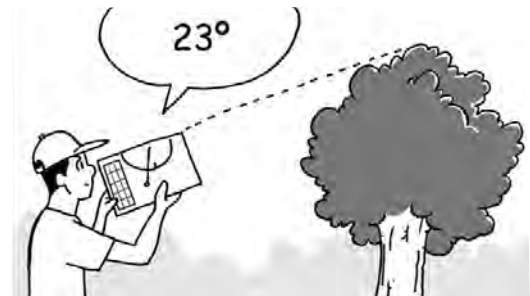


Figura 27. Observación y medición del ángulo al ápice del árbol utilizando clinómetro de papel

Paso 5. Cálculo de las mediciones (Figura 28): Suma (Figura 29 a) o resta (Figura 29 b) de los resultados de medición.

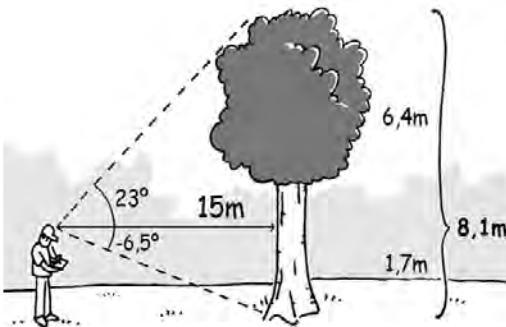


Figura 28. Cálculo de las mediciones de altura

Paso 6. Corrección de la inclinación de árboles (Figura 29 d). Donde: $H = \text{Raíz}(11^2+5^2)$

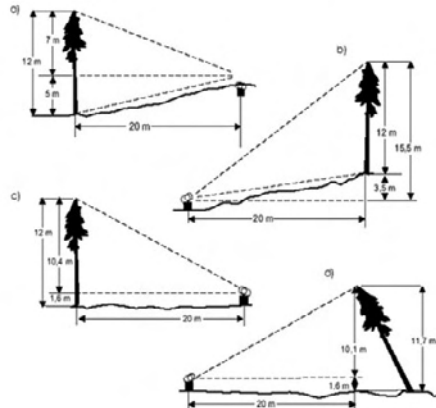


Figura 29. Ilustración sobre medición de altura

Fuente: FAO 2004

correspondiente a la inclinación. En este caso Θ es el ángulo entre la horizontal y la recta A-B, por lo tanto $d1 = h1/\text{coseno}(\Theta)$. Para agilizar las mediciones en campo se puede utilizar el cuadro de corrección de inclinación (Anexo 1).

Para medir la altura de cada árbol se utiliza la siguiente fórmula:

$$H = \text{Tang.}(X) * D$$

Donde:

H = altura en metros

Tang. (X) = tangente del ángulo en grados

D = distancia en metros.

III. MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN DE BIOMASA SOBRE EL SUELO

III.1. Biomasa arbórea

Existen dos métodos para medir y estimar la biomasa arbórea sobre el suelo: el método directo y el indirecto. El método directo (o destructivo) utilizado para la construcción de ecuaciones alométricas y factores de expansión¹⁸ de la biomasa, consiste cortar uno o más individuos (árboles), determinar la biomasa por medio del peso directo de cada uno de los componentes (fuste, ramas y hojas) y extrapolar los resultados para el área total. El método indirecto consiste en utilizar ecuaciones o factores de expansión que permitan relacionar algunas dimensiones básicas obtenidas en campo (de fácil medición) con características de interés, de forma que no sea necesario medir estas últimas. Por ejemplo, se puede utilizar una ecuación que permita calcular la biomasa total de un árbol mediante la medición de su diámetro. Estas ecuaciones son generadas por medio de una técnica estadística llamada análisis de regresión.



Figura 30. Corte de árbol en segmentos para medición de un tronco para desarrollo de ecuación alométrica

En esta guía describiremos el método indirecto para estimar la biomasa sobre el suelo de especies arbóreas y no arbóreas, considerando ecuaciones alométricas ya existentes.

Las ecuaciones alométricas para estimar la biomasa arbórea sobre el suelo están en función del tipo de vegetación y especie medida (plantaciones forestales en monocultivo, barbechos y bosques naturales o incluso para árboles dispersos) y tipo de componente.

¹⁸ El factor de expansión de biomasa (FEB) es multiplicado por el volumen del fuste de cada árbol permitiendo estimar la biomasa aérea total. Este factor es menos preciso, promovido y utilizado que las ecuaciones alométricas.

Recuadro 7. Cálculo de biomasa arbórea sobre el suelo utilizando ecuación alométrica genérica

$$B_{ASU} = f(\text{datos dimensionales})$$

Donde:

B_{ASU} : es la biomasa arbórea sobre el suelo de una unidad, en kilogramos de materia seca por árbol (kg M.S./árbol);

f (datos dimensionales): es una ecuación alométrica relacionando la biomasa sobre el suelo (kg M.S./árbol) a los datos dimensionales medidos en campo (ej. dap y altura total del árbol, etc.).

Para más detalles consultar la sección VIII

Fuente: Adaptado de ARAM0001¹⁹ 2005

III.1.a. Inventario de biomasa en plantaciones forestales



Figura 31. Plantaciones forestales comerciales de *Bombacopsis quinata* y *Tectona grandis*

Para el caso de plantaciones forestales en monocultivo se recomienda establecer parcelas cuadráticas o rectangulares. El tamaño de la parcela deberá estar de acuerdo con el espaciamiento entre plantas (ej.: 2m x 2m, 3m x 2m) y el tamaño del dap a ser medido. Teniendo en consideración el costo y tiempo de establecer una parcela, se recomienda tener un mínimo de 20 árboles en cada parcela muestreada. Usualmente, para inventarios forestales de plantaciones comerciales, se utilizan parcelas de 10m X 10m (100 m²). Para facilitar la decisión sobre el tamaño de la parcela se puede utilizar las siguientes medidas: parcela de 2m X 2m para individuos con diámetro menor o

¹⁹ Metodología revisada de línea de base de forestación y reforestación:
<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/51946.html>

igual a 5 cm; 10m X 10m para individuos con dap entre 5 a 20 cm y, 25m X 25m para individuos con dap mayor a 20 cm.

Para estimar la biomasa total se utilizan ecuaciones alométricas (Cuadro 4) de acuerdo con la situación local (clima, ecosistema, especie y diámetro).

Cuadro 4. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa sobre el suelo (kg de materia seca por árbol) en plantaciones forestales comerciales (monocultivo)

Ecuación alométrica	Especies	Diámetros (cm)	R ²	Fuentes
Especies Forestales Comerciales				
$Y = 0,153 \cdot \text{dap}^{2,382}$	<i>Tectona grandis</i> ^b	10-59	0,98	1
$Y = 0,0908 \cdot \text{dap}^{2,575}$	<i>Tectona grandis</i> ^c	17-45	0,98	2
$Y = 0,0103 \cdot \text{dap}^{2,993}$	<i>Bombacopsis quinata</i> ^d	14-46	0,97	3
$Y = 1,22 \cdot \text{dap}^2 \cdot \text{HT} \cdot 0,01$	<i>Eucalyptus sp.</i> ^e	1-31	0,97	4
$Y = 0,08859 \cdot \text{dap}^{2,235}$	<i>Pinus pinaster</i> ^f	0-47	0,98	5
$Y = 0,97 + 0,078 \cdot \text{SB} - 0,00094 \cdot \text{SB}^2 + 0,0000064 \cdot \text{SB}^3$	<i>Bactris gasipaes</i> ^g	2-12	0,98	6
$Y = -3,84 + 0,528 \cdot \text{SB} + 0,001 \cdot \text{SB}^2$	<i>Hevea brasiliensis</i> ^g	6-20	0,99	6
$Y = -18,1 + 0,663 \cdot \text{SB} + 0,000384 \cdot \text{SB}^2$	<i>Bertholletia excelsa</i> ^g	8-26	0,99	6
Palmeras				
$Y = 0,182 + 0,498 \cdot \text{HT} + 0,049 \cdot (\text{HT})^2$	<i>Chrysophylla sp</i>	0,5-10,0	0,94	7
$Y = 10,856 + 176,76 \cdot (\text{HT}) - 6,898 \cdot (\text{HT})^2$	<i>Attalea cohune</i>	0,5-15,7	0,94	7
$Y = 24,559 + 4,921 \cdot \text{HT} + 1,017 \cdot (\text{HT})^2$	<i>Sabal sp</i>	0,2-14,5	0,82	7
$Y = 23,487 + 41,851 \cdot (\ln(\text{HT}))^2$	<i>Attalea phalerata</i>	1-11	0,62	7
$Y = 6,666 + 12,826 \cdot (\text{HT}^{0,5}) \cdot \ln(\text{HT})$	<i>Euterpe precatatoria</i>	1-33	0,75	7

Donde:

Y = materia seca sobre el suelo, en kg de materia seca por árbol

dap = diámetro a la altura del pecho en cm

HT = altura total del árbol, en metros (en las palmeras este es el fuste principal, excluyendo las hojas)

SB = área basal, en cm²

e: 87 ejemplares de 5 a 47 años de edad.

c: 9 ejemplares de 20 años de edad.

d: 17 ejemplares de 10 a 26 años de edad.

e: valores agrupados para 458 ejemplares de *Eucalyptus ovata*, *E. saligna*, *E. globulus* y *E. nites* de 2 a 5 años de edad.

f: 148 ejemplares de 1 a 47 años de edad.

g: 7 a 10 ejemplares de 7 años de edad.

Fuentes: 1) Pérez y Kanninen 2003; 2) Kraenzel et al. 2003; 3) Pérez y Kanninen 2002; 4) Senelwa y Sims 1998;

5) Ritson y Sochacki 2003; 6) Schroth et al. 2002.; 7) Delaney et al. 1999; Brown et al. 2001

Fuente: LULUCF 2003

En caso se utilicen ecuaciones alométricas obtenidas de la literatura, se recomienda verificar la confiabilidad del modelo colectando de forma destructiva individuos (árboles) de diferentes tamaños, dentro del área del proyecto, pero fuera de las parcelas de muestreo, estimando su biomasa y comparándola con el resultado de la ecuación seleccionada. La biomasa estimada debe estar dentro de un margen de +/- 10% prevista por la ecuación. La cantidad de árboles que deben ser colectados para esta verificación debe estar, en la medida de lo posible, próxima al número mínimo de árboles recomendado por el modelo, o en ausencia de esta información, al número de árboles utilizado para construir el modelo. Esta verificación también dependerá de las categorías de tamaños establecidas y del número de especies presentes. Cuanto mayor sea la heterogeneidad del bosque, mayor será la cantidad de árboles necesarios. En lo posible, se recomienda también tener en consideración los siguientes criterios

- Utilizar ecuaciones que hayan sido desarrolladas en localidades con condiciones climáticas semejantes al área del proyecto;
- Que parte de las especies utilizadas para desarrollar las ecuaciones también se encuentren presentes en el área del proyecto; y
- Que las características (diámetro y altura) de los individuos utilizados para desarrollar las ecuaciones sean semejantes a las características de los individuos del área del proyecto.

Caso contrario, se recomienda desarrollar ecuaciones alométricas locales. Los procedimientos paso a paso para desarrollar ecuaciones alométricas de biomasa serán presentados en la última sección de esta guía.

III.1.b. Inventario de biomasa forestal en barbecho, bosque natural y sistemas agroforestales (SAFs)

Para evaluar especies leñosas en barbecho, bosques naturales y sistemas agroforestales, el tamaño de la parcela debe estar en función del tipo, edad y densidad del ecosistema.

Para bosques naturales y sistemas agroforestales se recomienda utilizar parcelas rectangulares y cuadradas de: 20 x 100 m (2000 m²) para la medición de árboles y palmeras con dap superior a 30 cm, y subparcelas de 5 x 40 m (200 m²) para individuos menores con dap entre 5 a 30

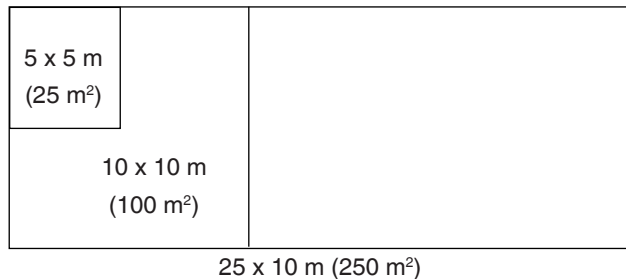


Figura 32. Representación gráfica del formato de parcela para el inventario de barbechos, bosques y SAFs

cm. Para barbechos se recomienda parcelas rectangulares de 250 m² (25 x 10 m, Figura 32) para árboles y palmeras con dap superior a 10 cm; parcelas de 100 m² (10 x 10 m) para árboles de 5 a 9.9 cm de dap, y subparcelas de 25 m² (5 x 5 m) para especies forestales con diámetros inferiores a 4.9 cm y \geq a 1.5 m de altura. En estas últimas, los arbustos (vegetación de menos de 4.9 cm de dap y menos de 1.5 m de altura) serán contados. Estas formas y dimensiones de parcelas también pueden ser utilizadas para plantaciones de especies frutales y palmeras.

Para estimar la biomasa total se utilizan ecuaciones alométricas de referencia (Cuadro 5) de acuerdo con la situación local (clima, ecosistema, especie y diámetro). Cabe destacar que las ecuaciones alométricas de especies forestales en bosques tropicales se encuentran principalmente en función de una única variable, el dap. Esto ocurre por las dificultades de visualizar las copas de los árboles, para medir la altura individual en bosques cerrados (Chave *et al.* 2005) y que pueden aumentar el error muestral.

Cuadro 5. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa sobre el suelo (kg de materia seca por árbol) en bosques naturales y barbechos

Ecuación Alométrica	Tipo de Bosque	Intervalo de dap Medidos
$Y = \exp[-2,289 + 2,649 \cdot \ln(\text{dap}) - 0,021 \cdot (\ln(\text{dap}))^2]$	Maderas duras de zonas tropicales húmedas	5 - 148
$Y = 21,297 - 6,953 \cdot (\text{dap}) + 0,740 \cdot (\text{dap})^2$	Maderas duras de zonas tropicales muy húmedas	4 - 112

Donde:

Y = materia seca sobre el suelo, en kg de materia seca por árbol

dap = diámetro a la altura del pecho, en cm

ln = logaritmo natural; exp = "elevado a la potencia de"

Se caracterizan como zonas tropicales húmedas regiones con precipitaciones entre 2.000-4.000 mm/año en tierras bajas; "zona tropical muy húmeda" se refiere a regiones (en tierras bajas) con precipitaciones mayores de 4.000 mm/año.

Fuente: IPCC 2003 citando a Brown 1997; Brown y Schroeder 1999; Schroeder *et al.* 1997

En el Anexo 4 se presentan ecuaciones alométricas para estimar la biomasa sobre el suelo de especies utilizadas en sistemas agroforestales. Para el caso de especies forestales que sufren manejo de poda constantemente (abajo de 1,3 m de altura), o que tienen varios troncos, se recomienda establecer ecuaciones alométricas a partir del diámetro basal (Figura 33).



Plantación comercial de palmito



Medición de diámetro basal



Medición de la altura del fuste principal excluyendo las hojas

Figura 33. Medición de altura y diámetro basal, plantación comercial de palmito (*Bactris gasipaes*), Costa Rica

Fuente: Ares *et al.* 2002.

III.1.c. Inventario de árboles dispersos

Para estratos con baja densidad de árboles se recomienda utilizar una parcela circular de 400 m² (11,28 m de radio, Figura 34), lo que reduce el tiempo necesario para el establecimiento de una parcela. El primer paso consiste en localizar aleatoriamente un punto en el centro de la parcela, demarcando con una estaca de madera, al cual se recomienda amarrar una cuerda o cinta métrica de 11,28 m de largo. En seguida se registran todos los árboles (especie, dap y altura). Para estimar la biomasa total se utiliza la ecuación alométrica (Cuadro 6) de acuerdo con la situación local (clima, ecosistema, especie y diámetro).

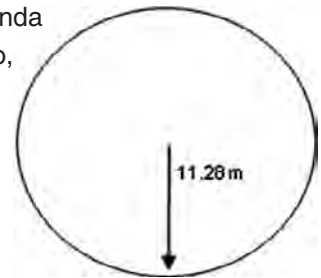


Figura 34. Representación gráfica del formato de parcela circular para el inventario de árboles dispersos

Cuadro 6. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa sobre el suelo (kg de materia seca por árbol) en árboles aislados (dispersos)

Ecuación Alométrica	Tipo de Bosque	Fuente
$\text{Log}_{10} Y = -2.18062 + 0.08012(\text{dap}) - 0.0006244(\text{dap}^2)$	Árboles dispersos en pasturas en América Central	1
$Y = 4.5 + 7.7 * H$	Palmeras	2

Donde:

Log₁₀ Y = Logaritmo de referencia 10 de la materia seca sobre el suelo, en kg de materia seca por árbol

Y = materia seca sobre el suelo, en kg de materia seca por árbol

H: altura en metros; dap = diámetro a la altura del pecho en cm

Fuentes: 1) Ruiz 2002; 2) Frangi y Lugo 1985

III.1.d. Cálculo de stocks de carbono en la biomasa arbórea

Recuadro 8. Cálculo de stocks de carbono en la biomasa arbórea

Paso 1. Cálculo de biomasa arbórea sobre el suelo utilizando ecuación alométrica genérica

$$B_{AU} = f(\text{datos dimensionales})$$

Donde:

B_{AU} = es la biomasa arbórea sobre el suelo de una unidad, en kilogramos de materia seca por árbol (kg M.S./árbol);

f (datos dimensionales): es una ecuación alométrica relacionando la biomasa sobre el suelo (kg M.S./árbol) a los datos dimensionales medidos en campo (ej. dap, y altura total del árbol, etc).

Paso 2. Cálculo de biomasa arbórea por hectárea

$$B_A = (\sum_{AU}/1000) \times (10000/\text{área de la parcela})$$

Donde:

B_A = Biomasa arbórea sobre el suelo (t MS/ha);

\sum_{AU} = Sumatoria de la biomasa arbórea de todos los árboles de la parcela (kg M.S./área de la parcela);

Factor 1000 = Conversión de las unidades de la muestra de kg MS/t MS

Factor 10000 = Conversión del área (m²) a hectárea

Paso 3. Cálculo del stock de carbono en la biomasa arbórea por hectárea

$$\Delta C_{BA} = (B_A * CF)$$

Donde:

ΔC_{BA} = Cantidad de carbono en la biomasa sobre el suelo (t C/ha);

B_A = Biomasa arbórea sobre el suelo (t MS/ha);

CF = Fracción de carbono (t C /t MS). El valor estándar del IPCC para $CF = 0,5$.

III.2. Biomasa de vegetación no arbórea

La vegetación no arbórea, como plantas herbáceas, arbustivas y gramíneas, está presente en todas las formas de uso del suelo (forestal, agrícola y pasturas).

Para muestreo de las vegetaciones arbustivas de pequeño porte, herbáceas y gramíneas, se recomienda el uso de parcelas temporales aleatorias establecidas por medio de un marco cuadrado de 0,25 m² (50 cm x 50 cm). El proceso consiste en tirar aleatoriamente el marco (Figura 35) dentro de la parcela, y en seguida cortar al ras del suelo todo el material localizado dentro del marco y pesarlo. De cada muestra fresca se debe obtener una sub-muestra (200 g) que debe ser guardada en bolsas (plásticas o de papel) debidamente identificadas, que serán enviadas al laboratorio, para secado en horno-estufa de aire forzado a 60°C, hasta obtener un peso constante, determinándose así la relación entre materia seca y húmeda, y la cantidad de carbono. Con los valores obtenidos se debe calcular el total de toneladas de materia seca por hectárea (t MS/ha) y posteriormente la cantidad de carbono por hectárea (t C/ha).



Figura 35. Ejemplo ilustrativo de la forma de tirar aleatoriamente el marco y la forma de coleccionar vegetación herbácea y gramínea en el campo.

Para vegetación no arbórea de gran porte, se establece una pequeña parcela de 4 m² (2m x 2m). Estas parcelas deben ser establecidas aleatoriamente dentro de cada estrato. Para el caso de muestreo de vegetación no arbórea en áreas forestales, estas parcelas pueden ser consideradas como una sub-parcela localizada en el interior de la parcela forestal establecida para el inventario. Se debe cortar al ras del suelo todo el material localizado dentro del marco, siguiendo el mismo procedimiento utilizado para muestreo de la vegetación herbácea y gramínea.

También existe la posibilidad de desarrollar y utilizar ecuaciones de biomasa para arbustos, basadas en variables como área de la copa, altura y diámetro de la referencia de plantas, y otras variables relevantes, como por ejemplo, número de tallos.

Recuadro 9. Cálculo de stocks de carbono en vegetación no arbórea

Paso 1. Cálculo de la materia seca de la muestra

$$MS_{\text{muestra}} = (MF_{\text{sub-muestra}} / MS_{\text{sub-muestra}}) \times MF_{\text{muestra}}$$

Donde:

MS_{muestra} = materia fresca de la muestra (kg/0,25 m² para vegetación arbustiva de pequeño porte, herbáceas y gramíneas o kg/4 m² para vegetación arbustiva de grande porte)

$MF_{\text{sub-muestra}}$ = materia fresca (kg) de la sub-muestra llevada para la determinación de la cantidad de humedad.

$MS_{\text{sub-muestra}}$ = materia seca (kg) de la sub-muestra llevada para la determinación de la cantidad de humedad.

MF_{muestra} = materia fresca de la muestra (kg/0,25 m² para vegetación arbustiva de pequeño porte, herbáceas y gramíneas o kg/4 m² para vegetación arbustiva de grane porte)

Paso 2. Cálculo de la cantidad de carbono en la muestra de la vegetación no arbórea

$$\Delta C_{\text{BN muestra}} = MS_{\text{muestra}} * CF$$

Donde:

$\Delta C_{\text{BN muestra}}$: Cantidad de carbono en la biomasa de la muestra de vegetación no arbórea (kg C/0,25 m² o kg/4 m²);

CF: es la fracción de carbono (kg C /kg MS) determinada en el laboratorio o utilizando el valor padrón del IPCC = 0,5.

Paso 3. Cálculo de la cantidad de carbono en la biomasa de la vegetación no arbórea por hectárea.

La cantidad de carbono en la biomasa de la vegetación no arbórea por hectárea es calculada a partir del tamaño del marco (0,25 m² o 4 m²), convirtiendo las unidades de la muestra de kg C a t C (dividiendo por 1000).

$$\Delta C_{\text{BN}} (\text{t C/ ha}) = (10000 \text{ m}^2 / 0,25 \text{ m}^2 \text{ o } 4 \text{ m}^2) \times ((\sum \Delta C_{\text{BN muestras}} / \text{número de muestras}) / 1000)$$

Donde:

ΔC_{BN} = Cantidad de carbono en la biomasa de vegetación no arbórea (t C/ ha);

$\sum \Delta C_{\text{BN muestras}}$ = sumatoria de la cantidad de carbono de todas las muestras (Kg C/ 0,25 m²)

Factor 1000 = conversión de las unidades de la muestra de kg MS a t MS

Factor 10000 = conversión del área a hectárea

III.3. Cálculo de stocks de carbono en la biomasa sobre el suelo

Para estimar el stock de carbono en la biomasa sobre el suelo, se utiliza una selección de ecuaciones alométricas aplicadas a las mediciones de los árboles.

Recuadro 10. Cálculo de stock de carbono en la biomasa sobre el suelo

$$\Delta C_{\text{BAS}} = \Delta C_{\text{BA}} + \Delta C_{\text{BN}}$$

Donde:

ΔC_{BAS} = Cantidad de carbono en la biomasa sobre el suelo (t C/ha);

ΔC_{BA} = Cantidad de carbono en la biomasa de vegetación arbórea (t C/ ha);

ΔC_{BN} = Cantidad de carbono en la biomasa de vegetación no arbórea (t C/ ha);

III.4. Material y equipo para medición de biomasa de vegetación arbórea y no arbórea

A continuación se presenta una descripción detallada del equipo y cantidad de mano de obra necesaria para muestrear los componentes de biomasa sobre el suelo (Cuadro 7).

Cuadro 7. Equipo y cantidad de personal necesario para muestreo de biomasa sobre el suelo

Actividad	Materiales y equipos	Personal	Rendimientos*
Muestreo de vegetación no arbórea	1 receptor GPS 5 m de cuerda de nylon 3 machetes 1 balanza de 25 kg o de más capacidad 1 balanza de 1 a 5 kg de capacidad con un décimo de gramo de precisión. Bolsas plásticas, marcadores, lápiz, formularios y cuadro de apoyo.	3 personas	40 – 60 minutos
Inventario Forestal	1 receptor GPS 1 cinta métrica de 50 metros 1 hipsómetro 3 machetes 1 estaca de madera de 2 m de largo (se puede conseguir en el campo) 30 m de cuerda de nylon. Marcadores, lápiz, formularios y cuadro de apoyo.	3 personas	120-150 minutos

Actividad	Materiales y equipos	Personal	Rendimientos*
Corte, medición y pesado de árboles y palmeras	1 motosierra 1 cinta métrica 4 machetes 1 balanza de 50 kg o de más capacidad 1 balanza de 1 a 5 kg de capacidad con un décimo de gramo de precisión. Bolsas plásticas, marcadores, lápiz, formularios y cuadro de apoyo.	4 personas	1-5 horas**

Fuente: Carbono y Bosques 2005

* Rendimientos por parcela, el número de parcelas por día dependerá del tiempo de traslado entre puntos de muestreo.

** Rendimiento por árbol. Éste varía de acuerdo con el tamaño de los árboles.

IV. MEDICIÓN DE BIOMASA SUBTERRÁNEA

IV.1. Biomasa de raíces arbóreas

La medición y estimación de la biomasa de raíces arbóreas es considerada una ardua tarea que demanda mucho tiempo y alto costo. De acuerdo con Schegel *et al.* (2001), el costo es de cerca US\$ 120 por raíz muestreada. Para inventariar raíces es necesario realizar excavaciones completas. Siendo así, algunos proyectos optan por utilizar relaciones entre la biomasa subterránea y la biomasa sobre el suelo por medio de ecuaciones alométricas obtenidas en la literatura científica. En este sentido, la lógica para esta etapa consiste en buscar información sobre ecuaciones alométricas para estimar la biomasa subterránea de especies o ecosistemas similares a los encontrados en el área del proyecto, o del estrato. Hay una mayor posibilidad de encontrar este tipo de información para especies forestales utilizadas en plantaciones comerciales.

Recuadro 11. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa de raíces de bosques

Fórmula para todos los tipos de bosques: $Y = \exp[-1,085 + 0,9256 \cdot \ln(BA)]$ $r^2: 0,83$

Fórmula válida para bosques tropicales: $Y = \exp[-1,0587 + 0,8836 \cdot \ln(BA)]$ $r^2: 0,84$

Donde:

Y = biomasa de la raíz en toneladas por hectárea de materia seca (t MS/ha)

ln = logaritmo natural; exp = "elevado a potencia de"

BA = biomasa aérea en toneladas por hectárea de materia seca (t MS/ha)

Tamaño de la muestra para construcción de los modelos: 151 individuos (árboles)

Fuente: IPCC 2003 citando a Cairns *et al.* 1997

Para el cálculo de stocks de carbono en biomasa de raíces arbóreas se recomienda seguir los mismos procedimientos descritos para el cálculo de carbono en biomasa de vegetación arbórea (ver Recuadro 8).

IV.2. Biomasa de raíces de vegetación no arbórea

No es posible estimar la biomasa de raíces de vegetación no arbórea a partir de los datos de la biomasa sobre el suelo. Por tanto, se recomienda realizar mediciones de campo. El método de muestreo (local y tamaño de parcela) debe ajustarse a

los procedimientos detallados para el método de muestreo de biomasa de vegetación no arbórea. La medición de la biomasa subterránea requiere la colecta de muestras de suelo por medio de cilindros de diámetros y profundidad conocidos o barrenos especiales para colecta de raíces (Figura 36). Los rizomas y tubérculos también son considerados parte del depósito de biomasa subterránea.

Como la concentración de raíces de vegetación no arbórea es mayor en la capa superior del suelo, disminuyendo exponencialmente a la medida que aumenta la profundidad, se recomienda muestreos hasta 40 cm, estratificados de acuerdo con las siguientes cuatro profundidades del suelo: 0-10, 10-20, 20-30 y 30-40 cm, se debe registrar claramente la profundidad correspondiente de cada capa por muestra colectada. En el laboratorio, las muestras de campo pasarán por un proceso de tamizado y lavado para eliminar suelo y piedras, restando únicamente raíces. Las raíces serán secadas en horno a 70°C hasta obtenerse un peso constante, para determinar la relación entre materia seca y húmeda y la cantidad de carbono. Posteriormente las raíces serán pesadas, determinando la biomasa por unidad de superficie. Con los valores obtenidos se calcula el total de toneladas de materia seca por hectárea (t MS/ha).

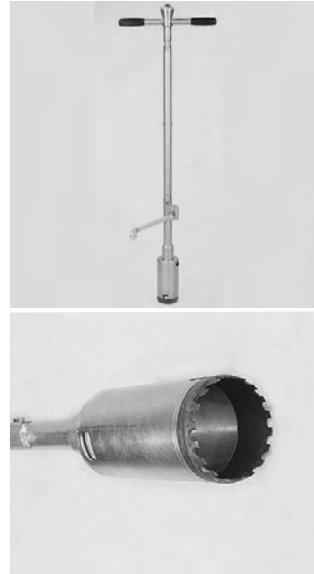


Figura 36. Barreno para raíces

Fuente: Idelsur 2008.

Recuadro 12. Cálculo de stocks de carbono en la biomasa subterránea

$$\Delta C_{BS} = (B_{BRA} * CF) + (B_{BRN} * CF)$$

Donde:

ΔC_{BS} : cantidad de carbono en la biomasa subterránea (t C/ha);

B_{BRA} : biomasa de raíces de especies arbóreas (t MS/ha);

B_{BRN} : biomasa de raíces de especies no arbóreas (t MS/ha);

CF : fracción de carbono (t C / t MS). Valor patrón del IPCC = 0,5.

V. MEDICIÓN DE BIOMASA EN MATERIA ORGÁNICA MUERTA

V.1. Hojarasca y detritos

Para muestreo de hojarasca se recomiendan parcelas temporales aleatorias demarcadas utilizando un marco cuadrado de 0,25 m² (50 cm x 50 cm). Para el caso de muestreo de hojarasca en áreas forestales, estas parcelas pueden ser consideradas como una sub-parcela localizada en el interior de la propia parcela forestal establecida para el inventario.

El proceso consiste en coleccionar todo el material localizado dentro de la parcela (marco). De cada muestra es hecha una sub-muestra (200 g) que deberá ser guardada en bolsas (plásticas o papel) debidamente identificada y ser enviada al laboratorio para secado en horno o en una estufa de aire forzado a 60°C, hasta obtenerse un peso constante. Se determina así la relación entre cantidad de humedad y la cantidad de carbono. Con los valores obtenidos se debe calcular el total de toneladas de materia seca por hectárea (t. MS /ha) y posteriormente calcular la cantidad de carbono por hectárea (t. C /ha).

Para el cálculo de stocks de carbono en hojarasca y detritos se recomienda seguir los mismos procedimientos descritos para el cálculo de carbono en vegetación no arbórea (ver Recuadro 9).

V.2. Troncos caídos, árboles muertos en pie y tocones mayores de 10 cm de diámetro.

La madera de árboles muertos en pie o de tocones muertos mayores de 10 cm de diámetro puede ser inventariada durante la medición de árboles vivos (inventario forestal), o por medio de un método de muestreo específico para estos componentes. En el primer caso, la madera muerta en pie será medida como parte del inventario forestal de árboles vivos, utilizando la misma metodología, registrándose algunas variables a parte. Entre éstas, la presencia de ramas y rebrotes. Para los árboles muertos con arquitectura de copa similar (presencia de ramas) a los árboles vivos, se recomienda utilizar la misma ecuación alométrica de los árboles vivos sustrayendo la biomasa de las hojas (aproximadamente entre 2% a 3% de la biomasa sobre el suelo). Para los árboles muertos sin ramas el volumen puede ser estimado midiendo el dap y altura. La biomasa también puede establecerse de acuerdo con la categoría de densidad de la madera.

Para inventariar los troncos caídos se recomienda utilizar un transecto que de preferencia cruce el centro de la parcela partiendo de un punto aleatorio hasta el extremo opuesto. Se recomienda que el transecto mida por lo menos 100 metros de longitud. El número de transectos deberá ser calculado siguiendo el mismo procedimiento descrito en el paso 4 - cálculo del número de parcelas requeridas. Para permitir otras mediciones en la misma área del transecto, es importante registrar con precisión la línea donde fue trazado el transecto.



Figura 37. Medición

Para el caso de troncos caídos (mayores de 5 cm de diámetro), el método consiste en estimar el diámetro de los troncos (Figura 37) por categoría de densidad (muchas veces relacionado con el estado de descomposición: sólido, intermedio y podrido).

Se recomienda utilizar un machete, golpear éste contra el tronco caído encontrado en el transecto. En caso que el machete rebote, se debe clasificar al tronco como sólido; en el caso que penetre ligeramente, se considera de densidad intermedia; y en caso la madera se desintegre, se considera podrido.

Recuadro 13. Cálculo de stocks de carbono en troncos caídos

Paso 1. Cálculo de la densidad para cada categoría pre-definida

$$\text{Densidad (t/m}^3\text{)} = \text{masa} / \text{volumen del fuste}$$

Donde:

Masa = masa de la muestra (fuste) de la categoría seca en el horno, en toneladas (t)

Volumen del fuste = en m³, π (media del diámetro/2)² x ancho promedio de la muestra fresca

Se determina la densidad promedio para obtener un valor único de densidad para cada categoría.

Paso 2. Para cada categoría de densidad se estima el volumen de troncos caídos por hectárea utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen (m}^3\text{/ha)} = \pi^2 \times [(D1^2 + D2^2 + \dots + Dn^2) / (8 \times L)]$$

Donde:

D1, D2,..., Dn = diámetro de cada tronco localizado en la trayectoria del transecto, en centímetros (cm).

L = largo (distancia) del transecto, en metros (m);

Paso 3. Cálculo de la biomasa de troncos caídos

La cantidad de biomasa de troncos caídos es calculada a partir de la multiplicación del volumen (m³/ha de todos los troncos caídos, calculado a partir del transecto) por la respectiva densidad:

$$B_{TC} = (vol_1 \times dens_1) + (vol_2 \times dens_2) + \dots + (vol_n \times dens_n)$$

Donde:

B_{TC}: biomasa de troncos caídos (t MS/ha)

vol₁, vol₂,..., vol_n = es el volumen (m³/ha) de los troncos caídos de cada categoría calculado a partir del transecto

dens₁, dens₂,..., dens_n = densidad (t/m³) de cada categoría

Paso 4. Cálculo de la cantidad de carbono en la biomasa de troncos caídos

$$\Delta C_{TC} = B_{TC} * CF$$

Donde:

ΔC_{TC} : cantidad de carbono en la biomasa de troncos caídos (t C/ha);

B_{TC}: biomasa de troncos caídos (t MS/ha);

CF: fracción de carbono (t C / t MS). Valor padrón del IPCC = 0,5.

Fuente: adaptado de Pearson *et al.* 2007.

Recuadro 14. Cálculo de stocks de carbono en biomasa de materia orgánica muerta

Para el cálculo de la cantidad de carbono en la biomasa de materia orgánica muerta

$$\Delta C_{MM} = \Delta C_{HD} + \Delta C_{AT} + \Delta C_{TC}$$

Donde:

ΔC_{MM} : cantidad de carbono en la biomasa de materia orgánica muerta (t C/ ha)

ΔC_{HD} : cantidad de carbono en la biomasa de hojarasca y detritos (t C/ ha)

ΔC_{AT} : cantidad de carbono en la biomasa de árboles muertos en pie y tocones muertos (t C/ ha)

ΔC_{TC} : cantidad de carbono en la biomasa de fuste caídos (t C/ ha)

VI. MEDICIÓN DE CARBONO EN EL SUELO

VI.1. Carbono orgánico

El carbono del suelo está presente en la forma orgánica e inorgánica. La forma orgánica equivale a la mayor reserva en interacción con la atmósfera. El carbono orgánico presente en el suelo representa un balance dinámico entre la absorción de material vegetal muerto y la pérdida por descomposición (mineralización). La información sobre stock de carbono en el suelo es importante para la elaboración de la línea de base. Entre tanto, la dinámica del carbono del suelo en el tiempo es difícil de ser estimada y los altos costos de medición muchas veces son incompatibles con los beneficios recibidos por proyectos de pequeñas propiedades rurales.

VI.1.a. Métodos de laboratorio para análisis de carbono del suelo

La selección del método de muestreo del suelo en campo debe tomar en consideración el tipo de análisis del carbono del suelo en el laboratorio que se tendrá a disposición. El método de Walkley Black (método de oxidación húmeda) es el más utilizado en laboratorios debido a que no demanda de equipos sofisticados. La importancia de seleccionar el método de oxidación húmeda es que éste no incluye el conteo de carbonatos.

44

Para proyectos que identifiquen que el carbono del suelo contribuirá como una importante fuente de stocks, se recomienda utilizar el método de combustión seca en el laboratorio. Entre tanto, esto implica realizar un análisis previo del suelo extrayendo carbono inorgánico por medio de acidificación, y que demanda identificar laboratorios dotados de los equipos necesarios.

VI.1.b. Método para el muestreo de suelo en campo

Entre las principales formas para realizar muestreos de suelo en campo, están el establecimiento de calicatas y el uso de barrenos. Como la abertura de calicatas representa un costo alto y demanda mucho tiempo, se recomienda la utilización del barreno. En esta sección describiremos los procesos utilizando el mismo (Figura 38).

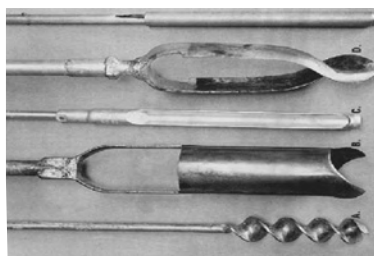


Figura 38. Diferentes tipos de barrenos

VI.1.c. Profundidad de muestreos

La profundidad a ser muestreada dependerá del tipo de proyecto, condiciones del área, especies utilizadas y profundidad prevista en que ocurrirán cambios en el stock de carbono del suelo. Generalmente, las concentraciones de carbono orgánico del suelo son más altas en su capa superior y disminuyen exponencialmente conforme

aumenta la profundidad. Se recomienda medir el depósito de carbono del suelo a profundidades de por lo menos 30 cm, dividiendo esta en tres horizontes (0-10, 10-20, 20-30 cm). Esta es la profundidad en que probablemente ocurrirán variaciones perceptibles en el depósito de carbono durante el periodo del proyecto. Para cada profundidad seleccionada, deberán ser colectadas muestras de suelo separadas para análisis de carbono orgánico, densidad aparente y raíces finas.

VI.1.d. Colecta de muestras para medición de carbono orgánico

En cada parcela (Figura 39) se recomienda coleccionar tres muestras de suelo para cada profundidad de muestra, utilizando un cilindro metálico con volumen conocido (ej. barreno). Estas muestras deben ser mezcladas (homogenizadas) en un mismo recipiente, para en seguida retirarse una muestra compuesta (200 g) que debe ser depositada en un saco (de papel o plástico) para ser llevada al laboratorio. Cada una de las muestras de suelo debe ser colectada con mucho cuidado para evitar la pérdida de material.

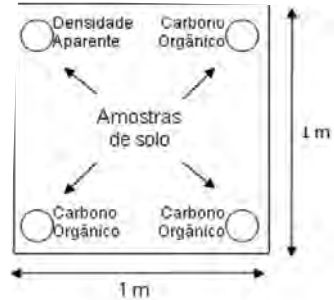


Figura 39. Parcela para muestreo de suelo

Recuadro 15. Cálculo de carbono orgánico en el suelo

El carbono almacenado en el suelo es calculado por medio de la sumatoria del carbono almacenado en cada horizonte definido:

$$COS = \sum_{\text{horizonte}=1}^{\text{horizonte}-n} COS_{\text{horizonte}} = \sum_{\text{horizonte}=1}^{\text{horizonte}-n} ([COS] * Densidad\ aparente * Profundidad * d * (1 - frag) * 10)_{\text{horizonte}}$$

Donde:

- COS = contenido de carbono orgánico del suelo, representativo del tipo de uso del suelo (t C/ ha)
- $COS_{\text{horizonte}}$ = contenido de carbono orgánico del suelo para un determinado horizonte (t C/ ha)
- [COS] = concentración de carbono orgánico del suelo para una determinada masa de suelo obtenida del análisis de laboratorio (g C /kg de suelo)
- Densidad aparente = masa de suelo por volumen de muestra (t de suelo m⁻³)
- Profundidad = profundidad del horizonte o espesor de la capa de suelo, en metros (m)
- frag = volumen porcentual de fragmentos gruesos/100, sin dimensiones²⁰
- Obs.: se utiliza el multiplicador final 10 para convertir las unidades en t C/ ha

Fuente: IPCC 2006b

²⁰ El valor [COS] usualmente es determinado en fracciones de finas del suelo (generalmente, < 2 mm). La densidad aparente debería ser corregida para incluir la proporción del volumen del suelo ocupado por fragmentos gruesos (partículas de diámetro ≥ 2 mm).

VI.1.e. Colecta de muestras para medición de densidad aparente

Para estimar el carbono almacenado en el suelo es necesario medir la densidad aparente del suelo a cada nivel de profundidad, en cada parcela. Para esto, se utiliza material de una de las extremidades de la parcela no utilizadas (Figura 40) para la colecta de muestras para la medición del carbono orgánico. Para determinar la densidad aparente, las muestras de suelo deben ser retiradas utilizando cilindros metálicos de volumen conocido, específicos para este tipo de muestreo. Estas muestras deben ser realizadas para cada profundidad seleccionada. La Figura 40 que se presenta a continuación describe paso a paso la forma de tomar una muestra para densidad aparente. El ejemplo a seguir fue realizado en una calicata.



Marcación de las profundidades a ser muestreadas



Penetración de los cilindros



Preparación para extraer la muestra de suelo sin destruir el material



Forma correcta de extraer el cilindro



Forma de preparar el cilindro para obtener la muestra final de suelo



Cilindro preparado para ser depositado en el saco



Extracción del suelo del cilindro para ser depositado en un saco

Figura 40. Secuencia de muestra tomada para densidad aparente en calicata

Fuente: Experiencia del proyecto Enfoques Silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas, CATIE

En suelos pedregosos, de textura gruesa, medir la densidad aparente por medio de cilindros probablemente resultará en valores sobrestimados. En esta situación se hace necesario el muestreo por medio de calicatas. De esta forma, para cada profundidad (horizonte) definida dentro del perfil, se recomienda realizar excavaciones estimando el volumen porcentual ocupado por las piedras. O sea, el porcentaje de pedregosidad es evaluada por medio de la observación directa, utilizando una regla para medir el tamaño máximo y mínimo de las piedras presentes.

Recuadro 16. Cálculo para determinar densidad aparente del suelo

En el laboratorio, las muestras de suelo serán secadas en una estufa de aire forzado a 105 °C por el tiempo necesario hasta que lleguen a peso constante, obteniendo así el peso seco del suelo proveniente de cada uno de los cilindros. El cálculo para determinar la densidad aparente es el siguiente:

$$Da = ms/v \text{ total}$$

Donde, la división entre la masa del suelo seco (ms , en gramos) y el volumen del cilindro (v total, en cm^3) corresponde a la densidad aparente (g/cm^3) del suelo. El volumen del cilindro es calculado por medio de la siguiente fórmula:

$$v = \pi \times r^2 \times h$$

Donde, r equivale al radio (en cm) y h a la altura (en cm).

VI.2. Biomasa de raíces finas (diámetro menor de 2 mm)

VI.2.a. Colecta de muestras para medición de biomasa de raíces finas

El procedimiento consiste en utilizar el barreno (con 8 cm de diámetro y 25 cm de altura) para extraer muestras de suelo exclusivamente para análisis de raíces. Estas muestras serán colectadas en distintos intervalos de profundidad, teniendo en consideración que raíces de especies vegetales no arbóreas predominan en los primeros 30 cm.

Las muestras obtenidas deben ser guardadas en bolsas plásticas debidamente identificadas y mantenidas en refrigeración (4 - 7 °C) hasta sus análisis de laboratorio.

En el laboratorio las muestras de campo pasarán por un proceso de tamizado y lavado (Figura 41) para eliminar suelo y piedras, restando únicamente las raíces finas. Se recomienda aplicar un factor de corrección de 1,25 a 2,0 a los resultados finales, para contemplar las pérdidas de raíces debido al proceso de muestreo y procesamiento. Las raíces serán secadas en un horno a 70°C hasta obtener peso constante. Posteriormente se realizan los respectivos cálculos para registrar la biomasa, en toneladas por hectárea de materia seca de raíces (t/ha), relativa a cada intervalo de profundidad.



Figura 41. Proceso de tamizado y lavado de raíces finas en laboratorio
Fuente: Ramos 2003.

VI.3. Material y herramientas para medición de carbono orgánico y de raíces finas

Algunos materiales y herramientas pueden resultar de difícil acceso, como los GPS o clinómetros, sin embargo, la mayoría es de fácil acceso y bajo costo (Figura 42). El cuadro 8 presenta las herramientas utilizadas comúnmente para el levantamiento de datos para la evaluación de carbono del suelo.

Cuadro 8. Herramientas necesarias para realizar un inventario de carbono del suelo

Materiales y Herramientas	Utilidad
Mapas	Se recomienda orientar la localización de las parcelas por medio de mapas del área del proyecto, de los estratos y de las parcelas con sus respectivas coordenadas geográficas.
Geoposicionador (GPS)	Orientar la localización de las parcelas
Brújula	Orientar la localización de las parcelas
Clinómetro	Medir el declive del suelo
Palas y excavadoras	Auxiliar en el muestreo del suelo
Equipo para lluvia, bolsas plásticas	Evitar pérdida de muestras debido a lluvias inesperadas
Bolsas de papel, plástico	Guardar las muestras de hojarasca, vegetación (herbácea, gramínea y arbustiva) y suelos
Cilindros para densidad aparente (barreno) y martillo	Tomar muestras de suelo sin dañar el material. Calcular la densidad aparente del suelo
Cinta métrica de 50 m	Medir el tamaño de las parcelas
Machetes, cuchillos, tijeras y sierra de podar	Colectar muestras. Necesarios para cortar plantas y raíces
Marcadores permanentes, lápiz	Marcar bolsas y anotar datos de campo y otras informaciones
Caja de herramientas	Para guardar herramientas de tamaño pequeño como cilindros, cuchillos, tijeras, martillos, espátulas, lápiz, bolsas, etc.



Figura 42. Materiales y herramientas para medición de carbono y raíces

Fuente: MacDicken 1997 y experiencia del proyecto Enfoques Silvopastoriles Integrados para el Manejo de Ecosistemas, CATIE

VII. CÁLCULO DEL CARBONO DEL ÁREA DEL PROYECTO

Para calcular el carbono total del área definida por el proyecto se debe sumar el carbono calculado parcialmente para cada uno de los estratos y categorías de uso de la tierra.

$$\Delta C_{\text{proyecto}} = \sum \Delta C_{\text{estratos}}$$

$\Delta C_{\text{proyecto}}$ = Cantidad de carbono del área proyecto definido (t C)

$\sum \Delta C_{\text{estratos}}$ = sumatoria de la cantidad de carbono de todos los estratos de todas las categorías de uso de la tierra medidas (t C)

VII.1. Cálculo de carbono para un determinado estrato

Para calcular el carbono de un estrato de una determinada categoría de uso de la tierra, simplemente se debe sumar todos los depósitos medidos

$$\Delta C_{\text{estrato}} = (\Delta C_{\text{BSA}} + \Delta C_{\text{BS}} + \Delta C_{\text{MM}} + \Delta C_{\text{HD}} + \Delta C_{\text{SO}}) * \text{área del estrato}$$

$\Delta C_{\text{estrato}}$ = Cantidad de carbono de un determinado estrato de una categoría de uso de la tierra (t C)

Área del estrato: en hectáreas (ha)

Donde los subíndices se refieren a los siguientes depósitos de carbono:

BSA= biomasa sobre el suelo (t C/ha)

BS = biomasa subterránea (t C/ha)

MM = madera muerta (t C/ha)

HD = hojarasca y detritos (t C/ha)

SO = suelos (t C/ha)

VII.2. Cálculo del incremento de carbono del proyecto

El incremento del stock de carbono del proyecto resultará de la diferencia en las cantidades de carbono calculadas en dos momentos de medición.

$$\Delta C_{\text{incremental}} = C_{t_2} - C_{t_1}$$

$\Delta C_{\text{incremental}}$ = Incremento de la cantidad de carbono del área total del proyecto (t C)

C_{t_1} = Cantidad de carbono del proyecto en el momento t_1 , considerando la superficie total (t C)

C_{t_2} = Cantidad de carbono del proyecto en el momento t_2 , considerando la superficie total (t C)

VII.3. Cálculo del carbono equivalente (CO₂e)

Como ya fue presentado, las reducciones de emisiones resultantes de la actividad de proyectos forestales son contabilizadas en forma de Certificados de Reducción de Emisiones (CRE's) y negociadas en mercados internacionales de carbono. Un CRE corresponde a una tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente (CO₂e), calculada en base al potencial de calentamiento global de este gas. Una tonelada de carbono equivale a 3,67 toneladas de CO₂e (obtenido en razón de los pesos moleculares 44/12). Para saber la cantidad de CO₂e emitido o almacenado a partir de la cantidad de carbono de un determinado depósito se debe multiplicar esta por 3,67. Por ejemplo, sí un proyecto que almacene (o secuestre) anualmente unas 15 t C/ha, podrá negociar en el mercado el equivalente a 55 CRE's por hectárea por año (55 t CO₂e/ha/año).

VIII. PROCEDIMIENTOS PARA SELECCIÓN Y GENERACIÓN DE ECUACIONES ALOMÉTRICAS DE BIOMASA

La biomasa de un ecosistema forestal está en función de su composición florística, densidad poblacional, etapa de desarrollo (edad del plantío, en el caso de forestación o reforestación), grado de restricción ecológica (al inicio de la plantación), condiciones edafoclimáticas y del estado de degradación del área. Como se vio en la sección III.1., existen dos métodos para estimar la biomasa de un área forestal, el directo y el indirecto.

Por medio de las ecuaciones obtenidas o seleccionadas por el método indirecto se puede estimar la biomasa total de algunos componentes de los árboles existentes en las áreas evaluadas. Comúnmente, técnicos e investigadores utilizan ecuaciones alométricas disponibles en la literatura para estimar la biomasa en ecosistemas forestales de sus regiones, las cuales pueden también ser utilizadas para estimar biomasa en áreas que presenten condiciones ecológico-productivas similares. No obstante, es necesario tener siempre en consideración la variación entre las áreas forestales donde se colectaron los datos para generar la ecuación, y las áreas donde se pretende aplicar determinada ecuación.

Generar modelos alométricos puede ser un proceso costoso que demanda conocimientos básicos de estadística y/o contar con el apoyo de un profesional de esta especialidad. Por tanto, es necesario definir entre utilizar ecuaciones alométricas existentes en la literatura o desarrollar ecuaciones propias. Pero ¿cómo seleccionar las ecuaciones existentes? y ¿cómo construir una ecuación alométrica? Estas y otras dudas serán respondidas a través de los procedimientos presentados a continuación.

VIII.1. ¿Qué es una ecuación alométrica de biomasa?

Una ecuación alométrica²¹ de biomasa es una herramienta matemática que permite conocer de forma simple, la cantidad de biomasa de un árbol por medio de la medición de otras variables. Las ecuaciones son generadas a partir de los análisis de regresión, donde se estudian las relaciones entre la masa (generalmente en peso seco) de los árboles y sus datos dimensionales (ej. altura, diámetro). Dependiendo

²¹ La alometría estudia los patrones de crecimiento de los seres vivos y las proporciones de sus partes en relación a las dimensiones totales.

del número de variables independientes (datos dimensionales) la ecuación puede ser una regresión lineal simple (una única variable, ej. dap) o una regresión lineal múltiple (más de dos variables, ej. dap, altura total). Dependiendo de las circunstancias las ecuaciones pueden ser lineales o no lineales. A continuación ejemplos teóricos de estas ecuaciones.

$$\text{Regresión Lineal Simple: } Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad i = 1, \dots, n.$$

$$\text{Regresión Lineal Múltiple: } Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_p x_{pi} \quad i = 1, \dots, n.$$

$$\text{Regresión no Lineal: } e = \alpha / (1 + e^{-(\lambda + kX)^{\delta}})^{\delta}$$

Donde:

Y es la variable dependiente (ej. volumen de biomasa en kg)

$x_1, x_2 \dots + x_p$ son las variables independientes (ej. dap, altura, etc.)

$\beta_0, \beta_1, \beta_2 \dots \beta_p$ son los parámetros (constantes) del modelo. β_0 es el valor de la ordenada en el origen, el valor de y para $x=0$.

Las variables independientes más utilizadas son el dap y la altura total. Algunas ecuaciones también consideran como variables independientes la altura comercial, volumen, densidad de la madera, entre otras.

El uso de ecuaciones alométricas permite el cálculo de la biomasa de una especie forestal de una manera no destructiva y extrapolable a situaciones de crecimiento similares (Montero y Montagnini 2005).

VIII.2. ¿Qué tipos de ecuaciones alométricas existen?

En la literatura pueden ser encontrados dos tipos de ecuaciones alométricas desarrolladas para estimar la biomasa de los árboles:

1. Ecuaciones individuales que calculan la biomasa de especies o plantaciones específicas como:

$$\text{Hevea brasiliensis}^{22} : e = -3,84 + 0,528 \cdot SB + 0,001 \cdot SB^2$$

$$\text{Tectona grandis}^{23} : e = 0,153 \cdot \text{dap}^{2,382}$$

Donde:

y = Biomasa seca sobre el suelo, en kg de materia seca por árbol

dap = diámetro a la altura del pecho, en cm

SB = área basal, en cm^2

²² Ecuación desarrollada por Schroth et al (2002) en base a 10 ejemplares de 7 años de edad y de 6 a 20 cm de dap (IPCC 2003).

²³ Ecuación desarrollada por Pérez y Kanninen (2003) en base a 87 ejemplares de 5 a 47 años de edad, con 10 a 59 cm de dap (IPCC 2003).

2. Ecuaciones generales que calculan la biomasa de cualquier especie de árbol presente en bosques naturales u otros usos de la tierra:

Maderas duras de zonas tropicales húmedas²⁴:

$$Y = \exp[-2,289 + 2,649 \cdot \ln(\text{DAP}) - 0,021 \cdot (\ln(\text{dap}))^2]$$

Donde:

ln = logaritmo natural; exp = "elevado a potencia de"

Las ecuaciones de biomasa pueden ser generadas para estimar un grupo de componentes (ej. biomasa aérea) o específicamente para uno de los componentes (ej. raíces). Las ecuaciones alométricas de biomasa para estimar raíces usualmente están en función de la biomasa aérea:

$$\text{Biomasa de raíces}^{25} : e = \exp[-1,0587 + 0,8836 \cdot \ln(\text{BA})]$$

Donde:

Y= biomasa de raíces en toneladas por hectárea de materia seca (t MS/ha)

ln = logaritmo natural; exp = "elevado a potencia de"

BA = biomasa aérea en toneladas por hectárea de materia seca (t MS/ha)

VIII.3. ¿Cómo seleccionar una ecuación alométrica para estimar biomasa?

Paso 1. Selección de especies

Para seleccionar una ecuación de biomasa, se debe hacer la siguiente pregunta:

¿Necesito una ecuación de biomasa para una especie arbórea específica de una plantación forestal o necesito una ecuación para calcular la biomasa de muchas especies de un bosque?

Paso 2. Revisión de literatura

Buscar en la literatura si existen ecuaciones alométricas disponibles para calcular la biomasa de la(s) especie(s) arbórea(s) de nuestro interés y que están presentes en el uso de la tierra de nuestro estudio.

Paso 3. Selección de ecuación alométrica

Si luego de buscar en la literatura, descubrimos que existe más de una ecuación alométrica para nuestro objetivo, debemos seleccionar la ecuación que mejor estime los datos. Para esto, se debe seguir los criterios de selección presentados en el Cuadro 9:

²⁴ Ecuación desarrollada para maderas duras de bosques tropicales húmedos con 5 a 148 cm de dap (IPCC 2003). Se caracterizan como zonas tropicales húmedas regiones con precipitaciones entre 2.000-4.000 mm/año en tierras bajas (IPCC 2003).

²⁵ Fórmula válida para bosques tropicales (IPCC 2003 citando a Cairns *et al.* 1997).

Cuadro 9. Criterios de selección de ecuaciones alométricas

Criterio	Descripción	¿Por qué es importante este criterio?
Condiciones edafoclimáticas	<p>Cuando sea posible, asegurar que la ecuación alométrica fue desarrollada en una región que cumple con condiciones climáticas semejantes a la zona del proyecto:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura promedio anual • Precipitación anual • Altura sobre el nivel del mar • Zona ecológica o zona de vida • Tipo de suelo 	<p>Las condiciones climáticas de una región influyen la diversidad de especies arbóreas y las estrategias de crecimiento de éstas.</p> <p>Cuanto más semejantes sean las condiciones edafoclimáticas de la zona donde se desarrolló la ecuación alométrica con las condiciones de nuestra área de trabajo, más precisa será la estimación de biomasa para el área de estudio.</p>
Especies utilizadas	<p>Dentro de las especies de árboles utilizadas para generar la ecuación, se debe tener al menos 30% de las principales especies de la lista de especies del bosque del cual queremos estimar los contenidos de biomasa.</p>	<p>Este criterio se aplica para ecuaciones alométricas generales que estiman biomasa en bosques.</p> <p>Cuanto mayor sea el número de especies similares en nuestra área de estudio, mayor será la precisión de nuestras estimativas de biomasa.</p>
Especies utilizadas dimensiones de los árboles	<p>Asegurar que los árboles seleccionados para desarrollar la ecuación alométrica tengan una amplitud de dap y altura similar a las características de los árboles en nuestra área de estudio.</p>	<p>A mayor semejanza entre las dimensiones de las especies y las dimensiones de nuestra área forestal, mayor será la precisión de nuestra estimación de biomasa.</p>
Comparar los resultados generados utilizando al menos dos ecuaciones alométricas	<p>Comparar las ecuaciones alométricas seleccionadas con la ecuación con el valor estadístico R2 más alto, y si es posible, la que presente mejor distribución de los residuos (ver mas en VIII.4.h.).</p>	<p>Este criterio se aplica en caso que se tenga más de una ecuación alométrica que cumpla con los criterios anteriores.</p> <p>Para proyectos de carbono es recomendable ser conservador en el informe de datos de biomasa (carbono). Datos muy altos de medición ex-ante resultan en altos valores para los créditos de carbono que el proyecto generará, con implicaciones negativas en los cálculos financieros, pudiendo causar el fracaso del proyecto.</p>

Paso 4. Verificación de confiabilidad de la ecuación alométrica seleccionada

Una vez seleccionada la ecuación según los criterios mencionados anteriormente, se recomienda evaluar la confiabilidad de la ecuación utilizando datos de biomasa de árboles representativos (tipo de especie y clase diamétrica) o de un conjunto de árboles presentes en el área (parcela) y que fueron obtenidos por el método destructivo. Más detalles sobre el procedimiento necesario para obtener los datos de campo (medición de variables, corte de los árboles, separación de partes, pesado de las partes, secado en laboratorio y determinación de biomasa seca) están disponibles en la próxima sección.

Se debe seleccionar cuidadosamente y, principalmente, evaluar la confiabilidad de los modelos alométricos que serán utilizados para estimar la biomasa de los componentes forestales. Caso contrario, podrán ocurrir sub o sobrestimaciones de los valores. Chave *et al.* (2005) comentan que varios autores notificaron que modelos tienden a sobre estimar biomasa. Como ejemplo de esta situación, partiendo de modelos existentes en la literatura, Alves *et al.* (1997) estimaron la biomasa de un bosque tropical de Rondonia, Brasil, de sucesión primaria y secundaria con diferentes edades. Las diferentes ecuaciones produjeron estimaciones con variaciones de hasta 400%.

En un reciente trabajo sobre desarrollo de ecuaciones alométricas para la región sur de la Amazonía, Nogueira *et al.* (2008) comprobaron que la estimación de emisiones de carbono a partir de la deforestación del bosque amazónico presentaba valores sobrestimados. Esta sobrestimación ocurrió debido a que los cálculos realizados hasta ahora se basaban en la extrapolación de datos obtenidos a partir de ecuaciones alométricas desarrolladas exclusivamente en bosques con alta densidad poblacional de la región de la Amazonía central. Además de la densidad del número de individuos arbóreos, otro factor importante identificado por el estudio que contribuyó con a sobrestimación fue que la densidad de la madera presente en los bosques con menor densidad poblacional de la región sur de la Amazonía es menor en comparación a la densidad de la madera de los bosques más poblados de la región central y, por lo tanto, poseían menos biomasa.

VIII.4. ¿Cómo desarrollar una ecuación alométrica?

En el caso de no encontrar en la literatura las ecuaciones alométricas específicas para las especies o tipo de bosque del área del proyecto, o para situaciones que no reúnan los criterios de selección mencionados anteriormente, se recomienda proceder con el desarrollo de una ecuación alométrica.

VIII.4.a. Procedimientos para el desarrollo de una ecuación alométrica

Para desarrollar una ecuación alométrica, inicialmente se deben seleccionar las especies y el número de individuos que sea necesario talar. Una vez seleccionados los árboles, se mide el diámetro a la altura de pecho (dap) y la altura (total o comercial). Posteriormente, se cortan los árboles seleccionados y se separan los troncos, ramas, hojas, y cuando es posible y deseable, también las raíces. Cada una de estas partes es llevada a la balanza en campo para conocer su peso en biomasa fresca. De esta biomasa fresca se extrae una muestra que es llevada al laboratorio para conocer su peso seco, que luego es denominado como biomasa seca. Posteriormente, con estos datos y mediante un programa de computación, se procede a probar distintos modelos alométricos para conocer cual es la mejor opción desde una perspectiva matemática. Los pasos necesarios para desarrollar una ecuación alométrica son resumidos en la figura 43.

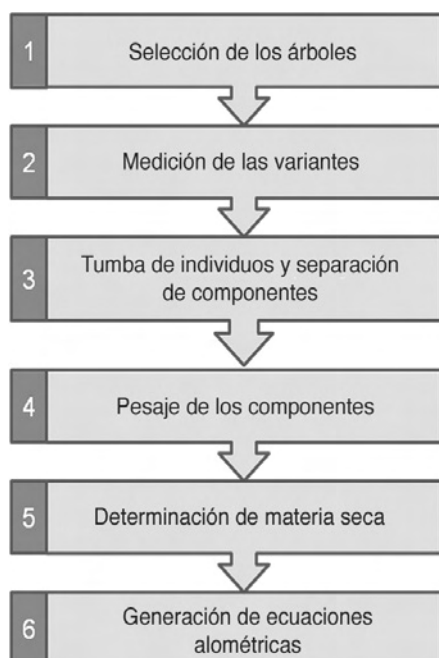


Figura 43. Procedimientos para el desarrollo de ecuación alométrica

VIII.4.b. Selección de árboles

Antes de seleccionar los individuos a cortar, se recomienda identificar cuáles son las especies dominantes en los distintos estratos forestales demarcados por el área del proyecto, principalmente en los bosques naturales. Para esto, se realiza el inventario forestal siguiendo los mismos procedimientos sugeridos en las secciones II y III.

El inventario forestal proporcionará información sobre la composición florística, como el número de especies, densidad de individuos y su estructura (dap y altura). Las especies a ser seleccionadas serán aquellas con mayor densidad de individuos por área. Para la caracterización y clasificación de los bosques de acuerdo a su composición florística, también se recomienda utilizar el Índice de Valor de Importancia (IVI).

Recuadro 17. Índice de Valor de Importancia - IVI

El análisis del IVI permite conocer cuales son las especies más importantes en el uso específico de la tierra (ver II.2). El IVI considera:

Abundancia: número de árboles por especie. Se distinguen entre abundancia absoluta (número de individuos/especie) y relativa (proporción porcentual de cada especie en el número total de árboles);

Frecuencia: existencia o falta de una especie en determinada parcela. La frecuencia absoluta se expresa en porcentaje (100% = existencia en todas las parcelas). La frecuencia relativa de una especie se calcula como su porcentaje en la sumatoria de las frecuencias absolutas de todas las especies.

Dominancia: el grado de cobertura de las especies es la expresión del espacio ocupado por ellas. Se recomienda calcular la dominancia absoluta de una especie a partir del dap. La misma es definida por la sumatoria de las áreas basales individuales, expresadas en m²/ha. La dominancia relativa se calcula como la proporción de una especie en el área basal total evaluada (100%).

Para saber más sobre el Índice de Valor de Importancia, consultar Curtis y McIntosh (1950).

Una vez seleccionadas las especies más importantes de acuerdo con su dominancia absoluta, se procede a seleccionar distintos individuos (árboles) que representen las distintas clases diamétricas. Con el ajuste de las ecuaciones alométricas de biomasa se adecuan y predicen mejor las determinadas clases. Por tanto, se recomienda dividir el estrato en distintas clases diamétricas, seleccionando un número determinado de individuos dentro de cada clase.

La división de la clase diamétrica puede estar en función de la abundancia relativa tomando en consideración su distribución diamétrica, o simplemente definida caso a caso de acuerdo con las posibilidades. Dependiendo de las circunstancias (ej. bosque con alta diversidad de especies), se recomienda dividir en al menos tres clases diamétricas (ej. $dap \leq 15$ cm; dap entre 15 cm y 30 cm; $dap \geq 30$ cm). Con la división en clases diamétricas se agrupan los árboles de características similares de tronco, disminuyendo la amplitud volumétrica entre clases, para de esta forma obtener coeficientes de mejor precisión con la misma cantidad de datos observados.

El número de individuos a cortar dependerá de los costos (tiempo) y de la variabilidad de la composición florística. Algunos estudios desarrollan ecuaciones alométricas partiendo de 15 árboles por especie o grupo de especies. Otros estudios, en bosques naturales, han utilizado todos los árboles presentes en una determinada parcela. Posteriormente, a partir de la información de estos ejemplares y aplicando los criterios de selección de modelos (ver sección VIII.4.h, paso 4) se evalúa la necesidad de cortar más individuos.

VIII.4.c. Medición de variables

Seleccionados los árboles, es necesario medir el diámetro a la altura del pecho (Figura 44) y la altura del árbol en pie (altura comercial o total). Se recomienda que las mediciones sean realizadas en la época del año en que los árboles presentan biomasa verde (hojas) en su totalidad.

VIII.4.d. Tala de los árboles y separación de partes

Este proceso debe ser realizado a cada uno de los árboles evaluados para la determinación de la biomasa seca. Luego de la debida medición de las características dimensionales (dap y altura) del individuo en pie, se corta el árbol al ras del suelo (Figura 45).



Figura 44. Medición del dap utilizando cinta diamétrica



Figura 45. Corte da árvore



Figura 46. Medición del tronco segmentado

Se dividen sus partes en tronco, ramas, hojas, y cuando es deseable y posible, raíces. Se segmenta el tronco (no más de 3 metros de ancho cada una) y a cada parte se le realiza la medición del diámetro (mínimo y máximo) y del largo (Figura 46). En el Anexo 3 se presenta un ejemplo del formulario para colecta de información de biomasa.

VIII.4.e Pesado de las partes

Posteriormente, son pesados (Figura 47) todos los componentes para conocer su peso fresco. De cada uno de los componentes (troncos, ramas, hojas y raíces) se extrae una muestra que es llevada al laboratorio. Para más detalles de este procedimiento, consultar la sección III.



Figura 47. Pesado de ramas cortadas

VIII.4.f Secado en laboratorio

Las muestras tomadas en campo son llevadas a un laboratorio para el secado en horno a una temperatura entre 70° y 100° C (dependiendo del tipo de componente) hasta que alcancen un peso constante. Para más detalles, consultar sección III.

VIII.4.g Determinación de biomasa seca

La biomasa seca (o materia seca) de cada componente del árbol se determina mediante la relación peso seco - peso fresco de las muestras de cada componente:

$$BS_{\text{componente}} = (PS_{\text{muestra}} / PH_{\text{muestra}}) * BH_{\text{componente}}$$

Donde:

BS = Biomasa seca del componente (kg);

PS = Peso seco de la muestra (g);

PH = Peso húmedo de la muestra (g);

BH = Biomasa húmeda del componente (kg).

La biomasa seca total de cada árbol es determinada sumando la biomasa seca de cada uno de sus componentes:

$$BS_{\text{total individuo}} = BS_{\text{tronco}} + BS_{\text{ramas}} + BS_{\text{hojas}} + BS_{\text{raíces}}$$

VIII.4.h Generación de una ecuación de biomasa

Como ya sabemos, las ecuaciones pueden ser generadas específicamente para uno (ej. ecuaciones alométricas de raíces) o más componentes (ej. ecuaciones alométricas de biomasa aérea) de una determinada especie o tipo de bosque. Las ecuaciones pueden estar en función de una determinada clase diamétrica (ej. 5 a 10 cm, 10 a 20 cm de dap) o para todos los diámetros presentes en una determinada plantación forestal o bosque (ej. 5 a 120 cm de dap).

Paso 1. Identificación de apoyo técnico y programa estadístico

Para generar los modelos se necesita conocimientos básicos de estadística o contar con el apoyo de un especialista en esta área. Además, se debe contar con un programa (ej. R²⁶, SAS²⁷, Minitab²⁸, Infostat²⁹, etc.) que genere las informaciones estadísticas y gráficos necesarios para la selección de las ecuaciones.

²⁶ <http://www.r-project.org/>

²⁷ <http://www.sas.com/software/>

²⁸ <http://www.mini-tabbrasil.com.br/>

²⁹ <http://www.infostat.com.ar/>

Paso 2. Definición de variables independientes

Seleccionado el programa estadístico, el primer procedimiento para generar la ecuación consiste en calcular los promedios, desviación estándar, valores máximos y mínimos de los datos colectados. En este momento se analiza la correlación de $(r)^{30}$ entre las variables dimensionales (independientes, ej. dap, altura total, etc.) en las variables de biomasa de cada componente de cada especie evaluada.

Siguiendo con el proceso, se elaboran diagramas de dispersión entre todas las variables para observar las tendencias y posibles relaciones entre las variables (dap, altura, biomasa) y la posible identificación de valores aberrantes (comúnmente los valores aberrantes son causados por errores de colecta de datos). Se recomienda incorporar una línea de ajuste para facilitar la interpretación de las correlaciones (Figura 48).

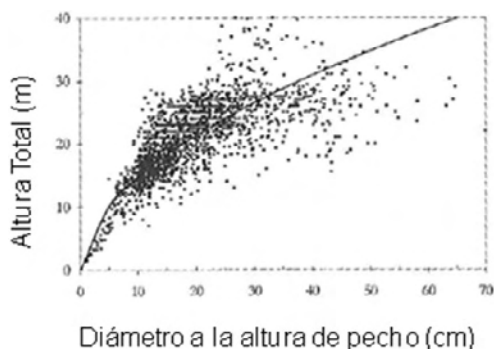


Figura 48. Línea de regresión y nube de puntos de pares de mediciones para la regresión alométrica simple $ht = f(dap)$ en los sajalos de los bosques de guadalupe en el delta del Río Patía, Pacífico Sur Colombiano.

Fuente: Ignacio 2003.

El dap, además de ser considerada la variable más fácil a ser medida en campo, principalmente en bosques naturales donde visualizar la altura total de los árboles es muy difícil, también es la variable que más se correlaciona con la biomasa. Frecuentemente, los modelos alométricos existentes en la literatura están únicamente en función de esta variable.

Paso 3. Selección de ecuaciones de regresión

Se recomienda inicialmente probar modelos de regresión ya existentes en la literatura para estimar la cantidad de biomasa (total o del componente específico) a partir del diámetro (dap), altura total, altura comercial, volumen, o una combinación de variables (usualmente entre dap y altura total). Entre los modelos de regresión existentes en la literatura más utilizados se incluyen:

³⁰ El análisis de correlación de Pearson (r) indica la relación entre dos variables lineales y los valores siempre serán entre +1 y -1. El signo (+ ó -) indica si la correlación es positiva o negativa y el valor del índice indica la fuerza de la correlación. Un índice superior a 0.70 (positivo o negativo) indica que las variables están fuertemente correlacionadas. De 0.30 a 0.70 (positivo o negativo) indica que la correlación es moderada. De 0 a 0.30 se considera como débil correlación.

Naslund	$Biomasa = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 (d^2 h) + \beta_3 (dh^2) + \beta_4 h^2$
Schumacher-Hall	$\text{Ln Biomasa} = \beta_0 + \beta_1 \text{Lnd} + \beta_2 \text{Lnh}$
Husch	$\text{Ln Biomasa} = \beta_0 + \beta_1 \text{Lnd}$
Meyer	$Biomasa = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 h + \beta_3 d^2 + \beta_4 (d^2 h) + \beta_5 (dh)$
Stoate	$Biomasa = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 d^2 + \beta_3 (d^2 h)$
Spurr	$\text{Ln Biomasa} = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln} (d^2 h)$

Donde: $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ y β_5 : parámetros del modelo; v: volumen en m³; d: dap en cm; h: altura total en m; Ln: logaritmo natural

Paso 4. Selección de modelos alométricos de biomasa

Para la selección del modelo se pueden utilizar los siguientes parámetros estadísticos (Cuadro 10):

Cuadro 10. Parámetros estadísticos de selección de ecuaciones alométricas

Parámetros estadísticos	Análisis
Lógica biológica del modelo	Buena parte de los técnicos relacionados con la colecta de datos son capaces de comprender relaciones entre variables dependientes, así como identificar las razones de la ocurrencia de valores atípicos (aberrantes).
Coefficiente de determinación (R ²)	El R ² expresa la cantidad de variación de la variable dependiente que es explicada por las variables independientes. Cuanto más próximo a uno (1) es el valor de R ² , mejor fue realizado el ajuste (Machado 2002).
Coefficiente de variación (CV%)	El coeficiente de variación es una medida relativa, que permite comparar la dispersión entre dos poblaciones, o la variación resultante de dos variables distintas (originadas de una misma población), que tengan diferentes unidades de medidas. Cuanto menor es el valor de CV%, mejor es el modelo.
Prueba F (análisis de varianza)	Prueba estadística que sirve para comparar varianzas. Utilizada en modelos lineales.

Estos indicadores estadísticos confirman la consistencia predictiva del modelo seleccionado. En algunas oportunidades se realizan transformaciones de los modelos de regresión evaluados con objetivo de mejorar el ajuste a los datos. La transformación puede simplificar los cálculos, pues permite usar análisis de regresión lineal y, además, incrementa la validación estadística del análisis al homogenizar la varianza sobre el rango de datos (Zapata *et al.* 2003). Sin embargo, la transformación puede introducir un sesgo sistemático en los cálculos. Para más detalles de cómo realizar las transformaciones de modelos consultar el Anexo 6.

Paso 5. Estimación de biomasa y divulgación de las ecuaciones

Una vez seleccionado(s) lo(s) modelo(s) alométrico(s) que mejor estima(n) los datos de campo (para cada clase diamétrica) y sus correspondientes ecuaciones (es decir, los resultados concretos de aplicar los modelos generales al grupo de individuos medidos), podremos estimar la biomasa para todo el sitio forestal. Cuando resulta posible, se recomienda publicar las ecuaciones para que otros técnicos e investigadores puedan utilizarlas en sus sitios de trabajo. Para esto, además de la ecuación, es necesario presentar informaciones sobre el sitio (composición florística, densidad de población, condiciones edafoclimáticas, estado de degradación del sitio), especies y dimensiones de los árboles utilizados (además de los elementos utilizados como criterios de selección de modelos). También se recomienda divulgar los gráficos generados. Se presentan a continuación dos ejemplos de los gráficos.

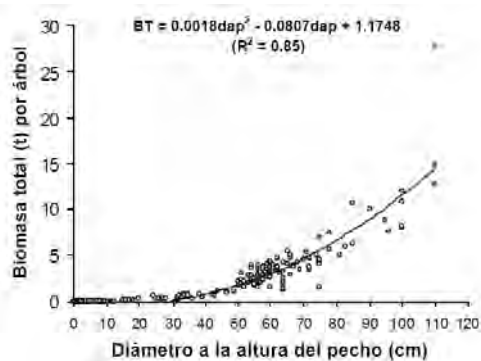


Figura 49. Relación de la biomasa total por árbol y el dap de 300 árboles de un bosque de la reserva de biosfera Maya, Petén, Guatemala

Fuente: Arreaga Gramajo 2002.

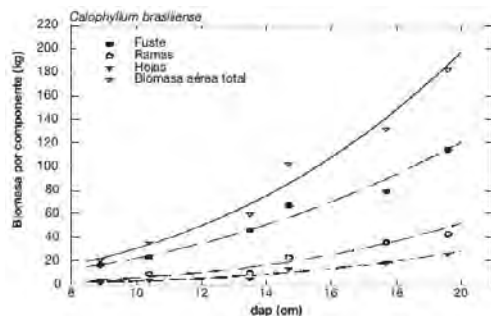


Figura 50. Dispersión de los datos de biomasa aérea seca de cada componente y las curvas de los modelos seleccionados en función del dap para *Calophyllum brasiliense*
Fuente: Montero e Montagnini 2005.

Con el objetivo de apoyar la comprensión de agentes de extensión que trabajan junto a pequeños y medianos productores rurales, esta guía describió paso a paso los procedimientos necesarios para la cuantificación y monitoreo del carbono almacenado y capturado por la biomasa y por el suelo en distintos tipos de usos de la tierra. Los usos de la tierra incluidos fueron plantaciones forestales, sistemas agroforestales, bosques naturales, pasturas y cultivos agrícolas.

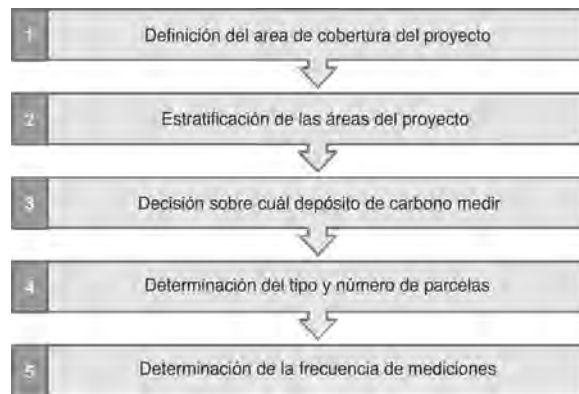


Figura 51. Pasos para la planificación de mediciones en campo

En la sección II se pudo comprender que, previamente a la etapa de mediciones en campo, es necesaria la planificación de actividades con el objetivo de simplificar, agilizar y reducir los costos de estas mediciones. Por tanto, se recomiendan los cinco pasos básicos ilustrados por el diagrama de la figura al lado.

En las secciones III a VII fueron presentadas las metodologías y procedimientos necesarios para la medición de biomasa y determinación de carbono en distintos componentes del sistema. A continuación se presenta un diagrama resumiendo estas secciones:

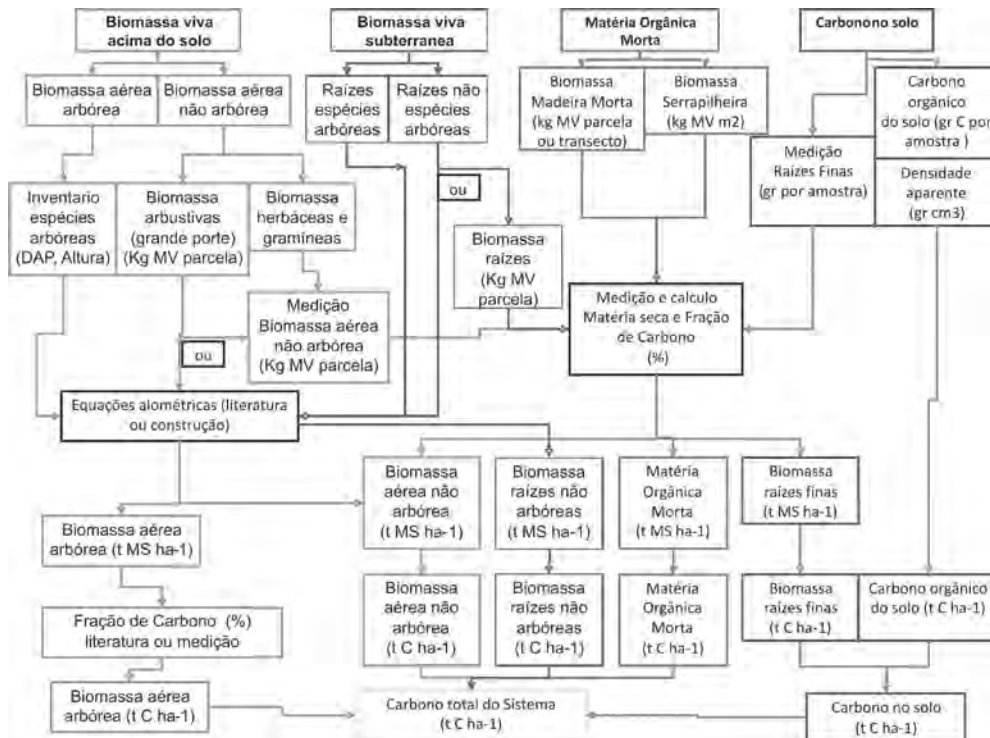


Figura 52. Diagrama de los procedimientos utilizados para la medición de biomasa y determinación de carbono en los componentes del sistema

X. BIBLIOGRAFIA

- Alarcón, L. O.; Owen, E.; Seeberg-Elverfeldt, C. 2007. Manual de Ordenamiento Predial para propietarios de bosque nativo. World Wildlife Fund (WWF). 26 p. Consultado en 03 junio de 2008. Tomado de: http://www.wildgift.org/downloads/manual_POP.pdf
- Alves, D. S; Soares, J. V.; Amaral, S.; Mello, E. M. K.; Almeida, S. A, S.; Silva, O.F.; Silveira, A. M. 1997. Biomass of primary and secondary vegetation in Rondônia, Western Brazilian Amazon. *Global Change Biology*, v.3.: 451-461.
- Ambiente Brasil S/S Ltda. 2008. Inventário Florestal. Consultado en 24 junio de 2008. Tomado de: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./florestal/index.html&conteudo=./florestal/inventario.html>
- Ares, A.; Boniche, J.; Quesada, J.P.; Yost, R.; Molina, E.; Smyth, T. J. 2002. Estimación de biomasa por métodos alométricos, nutrimentos y carbono en plantaciones de palmito en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 26(2): 19-30.
- Arreaga Gramajo, WE. 2002. Almacenamiento de carbono em bosques com manejo florestal sostenible em a Reserva de Biosfera Maya, Petén, Guatemala. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, CR. 73 p.
- Brown, S. 2002. "Measuring, monitoring, and verification for carbon benefits for forest-based projects." *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* 360: 1669-1683. Consultado en 12 mayo de 2008. Tomado de: [http://www.winrock.org/ecosystems/files/Measuring%20monitoring%20and%20verification%20of%20carbon%20benefits%20for%20forest-based%20projects%20\(2002\).pdf](http://www.winrock.org/ecosystems/files/Measuring%20monitoring%20and%20verification%20of%20carbon%20benefits%20for%20forest-based%20projects%20(2002).pdf)
- Burrough, P. A. 1986. Principles of geographical information systems. Oxford University Press, , 193 p.
- Carbono y Bosques. 2005. Protocolo para el muestreo, estimación y monitoreo del contenido de carbono en el proyecto: El renacimiento de la Orinoquia alta de Colombia.
- Cardona, J. M. 2004. Glosario Multilingue de Terminología Forestal (español, japonés, inglés, francés y portugués). Primera Edición. 350 p.

- Carvalho, K., Vieira, P. A., Ehringhaus, C., Treccani, G. 2008. Trilhas da Regularização Fundiária para Populações Rurais nas Florestas Amazônicas: Como decidir qual a melhor solução para regularizar sua terra? CIFOR/FASE.
- Chave, J.; Andalo, C.; Brown, S.; Cairns, M. A.; Chambers, J. Q.; Eamus D.; Foote, H.; Fromard, F.; Higuchi N.; Kira, T.; Lescure, J.-P.; Nelson, B. W.; Ogawa H.; Puig H.; Rier, B.; Yamakura T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Ecosystem Ecology*. No. 145: 87–99
- Curtis, JT; McIntosh, RP. 1950. The integration of certain analytic and synthetic phytosociological characters. *Ecology* 31: 434-455.
- Embrapa Meio Ambiente. 2008. Educação Ambiental para Agricultores e Comunidades Rurais – Urbanas. Consultado em 18 mayo de 2008. Tomado de: <http://www.cnpma.embrapa.br/unidade/index.php3?id=265&func=unid>
- Embrapa Pantanal. 2008. Zoneamento Ambiental da Borda Oeste do Pantanal. Maciço do Urucum e Adjacência. Consultado em 18 mayo de 2008. Retirado de: http://www.cpap.embrapa.br/agencia/borda_oeste/inicial.htm
- Emmer, I. 2007. Manual de contabilidad de carbono y diseño de proyectos. Proyecto Encofor. Quito, Ecuador. 22 p. Consultado em 11 de junio de 2008. Tomado de: http://www.joanneum.at/encofor/tools/tool_demonstration_sp/prefeasibility.htm
- ENGESAT. 2008. Consultado em 11 de junio de 2008. Tomado de: http://www.engesat.com.br/pub/fckeditor/Image/Resourcesat-1/543_IRS-2.jpg
- Freitas, L.J.M; de Souza, A. L., Garcia, H. L.; Lopes, M. da S. 2005. Análise técnica e estimativas de custos de inventário de prospecção em uma floresta estacional semidecidual submontana. *R. Árvore, Viçosa-MG*, v.29, n.1: 65-75
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2004. National forest inventory. Field manual. Template. Forest Resources Assessment WP 94. Rome, August. Consultado em 04 mayo de 2008. Tomado de: <http://www.fao.org/docrep/008/ae578e/AE578E00.htm#TopOfPage>
- Hairiah, K.; Sitompul, SM, van Noordwijk M.; Palm C. 2001. Methods for sampling carbon stocks above and below ground. ICRAF Southeast Asia. 32 pg. Consultado em 03 março de 2009. Tomado de: <http://www.worldagroforestry.org/sea/apps/publications/searchpub.asp?publishid=1003>

Higuchi, N.; Santos, J.; Jardim, F. C. S. 1982. Tamanho de Parcela Amostral para Inventários Florestais. *Acta Amazonica*, Manaus, v. 12, n. 1, p. 93-103, Consultado em 03 marzo de 2009. Tomado de: <http://acta.inpa.gov.br/redirect.php?volume=12&edicao=1&arquivo=v12n1a13.pdf&pasta=PDF&loc=sum>

Ignacio, J. V. 2003. Crecimiento em biomassa e acumulação de carbono em los sajales do delta do río Patía. Medição de a captura de carbono em ecosistemas florestais tropicales de Colombia: contribuciones para a mitigação do cambio climatico. Pp. 281-296.

Instrumento del Sur (Idelsur). 2008. Muestreadores de Suelo. Consultado en 17 mayo de 2008. Tomado de: http://www.idelsur.com/representadas/buscador/muestreadores_01.htm#

Locatelli, B. 2005. LULUCF: el papel de los bosques y las plantaciones en el cambio climático. VI Curso Internacional “Cambio Climático y Diseño de Proyectos MDL en los Sectores Forestal y Bio-energía” CATIE, Turrialba, Octubre de 2005.

MacDicken, K. 1997. A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects. Winrock International Institute for Agricultural Development, Arlington.

Machado, S. A.; Conceição, M. B.; Figueiredo, D. J. 2002. Modelagem do volume individual para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa*. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, Vol. 4, nº 2, jul/dez.: 185-197.

Montero, M. M.; Montagnini, F. 2005. Modelos alométricos para a estimação de biomassa de diez espécies nativas em plantaciones em a região Atlântica de Costa Rica. *Recursos Naturales e Ambiente/no. 45: Comunicação Técnica*. Pp. 118-125

Nogueira, E. M.; Fearnside, P. M; Walker, B. N.; Imbrozio, R. B.; Hermanus E. W. K. 2008. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management*. Volume 256, Issue 11:1853-1867

Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC). 2003. Guía de Buenas Prácticas del Uso de la Tierra, Cambio del Uso de la Tierra y Silvicultura (GBP UTCUTS). Métodos Complementarios y Orientación Sobre las Buenas Prácticas que Emanan del Protocolo de Kyoto. Capítulo 4. 132 pg. Consultado en 24 junio de 2008. Tomado de: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_languages.html

- Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC). 2005. Capítulo 4: Métodos complementarios y orientación sobre las buenas prácticas que emanan del Protocolo de Kyoto. Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Consultado en 03 junio de 2008. Tomado de: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.html>
- Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC). 2005b. Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas para UTCUTS. Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura.
- Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC). 2006. Capítulo 2: Metodologías genéricas aplicables a múltiples categorías de uso de la tierra. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Consultado en 03 junio de 2008. Tomado de: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_02_Ch2_Generic.pdf
- Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC). 2006b. Capítulo 3: Representación coherente de las tierras Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Consultado en 03 junio de 2008. Tomado de: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_03_Ch3_Representation.pdf
- Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC). 2006c. Glosario. Volumen 4. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Consultado en 03 marzo de 2009. Tomado de: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/0_Overview/V0_2_Glossary.pdf
- Pearson, T. R.H.; Brown, S. L.; Birdsey, R. A. 2007. Measurement Guidelines for the Sequestration of Forest Carbon. USDA Forest Service's Northern Global Change Research Program. 47 pg. Consultado em 24 junio de 2008. Tomado de: http://nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_nrs18.pdf
- Pearson, T. R.H.; Walker, S.; Brown, S. L. 2005. Sourcebook for Land use, Land-use change and forestry Projects. BioCarbon Fund. Winrock Internationa. 64 pg.
- Prodan, M.; Peters, R.; 1997 Mensura forestal. "Proyecto IICA/GTZ sobre Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible." Inter-American Institute for Cooperation on Agriculture, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, Inter-American Institute of Agricultural Sciences. Publicado por Agroamerica. 561 p.

Ramos Veintimilla, R.A. 2003. Fraccionamiento del carbono orgánico del suelo en tres tipos de uso de la tierra en fincas ganaderas de San Miguel de Barranca, Puntarenas-Costa Rica. Tesis M.Sc. CATIE Turrialba, Costa Rica. 81p.

Resources Research Institute (NRRI). 2008. Consultado en 22 junio de 2008. Retirado de: <http://www.nrri.umn.edu/worms/research/images/DBH-5.jpg>

Ruiz, A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 106 p.

Schlegel, B., Gayoso, J. y Guerra, J. 2001. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Manual de procedimientos para inventarios Consultado em 24 junho de 2008. Tomado de: de carbono en ecosistemas forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 17 p.

Segura Madrigal, M. A. 1999. Valoração do serviço ambiental de fixação e armazenamento de carbono em bosques privados do Área de Conservação Cordillera Volcánica Central. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 115 p.

Silva, J. N. M, 1980. Eficiencia de diversos tamanhos de formas de unidades de amostra aplicados em inventário florestal na região de Tapajos. Curitiba. Univerisidade Federal do Paraná. Tese de Mestrado – Engenharia Florestal.

Silva, J. N. M.; Lopes, J do C. A. 1984. Inventário florestal continuo em florestas tropicais: a metodologia utilizada pela EMBRAPA-CPATU na Amazonia brasileira. Belém, EMBRAPA. Documentos, 33. 36p.

Terra Ges. 2008. Consultado en 03 junio de 2008. Tomado de: <http://www.terragres.pt>

Vallejo, Álvaro, 2005. Maia - Monitoreo de proyectos de remoción de carbono bajo el Mecanismo para un Desarrollo Limpio del Protocolo de Kioto. 88 p.

Victoria's community information portal. 2008. Consultado en 24 junio de 2008. Tomado de: <http://home.vicnet.net.au/~grange/Recent.html>

Zamora-López, S. 2006. Efecto de los pagos por servicios ambientales en la estructura, composición, conectividad y stock de carbono de un paisaje ganadero en Esparza, Costa Rica. Tesis M.Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica.

Zapata, M.; Colorado, G. J.; Ignacio, J. V. 2003. Equações de biomassa aérea para bosques primarios intervenidos e secundarios. Medição de a captura de carbono em ecosistemas florestais tropicales de Colombia: contribuciones para a mitigação do cambio climático. Pp. 281 a 296.

Winrock International. 1999. Effect of Inventory Precision and Variance on the Estimated Number of Sample Plots and Inventory Variable Cost: The Noel Kempff Mercado Climate Action Project. Consultado en 03 marzo de 2009. Tomado de: http://www.winrock.org/ecosystems/files/Effect_of_Inventory_Precision_and_Variance.pdf

XI. ANEXOS

Anexo 1. Cuadro de corrección de inclinación

Inclinación	Grados sexagesimales	Factor	Distancias horizontales										Inclinación
			5	10	15	20	25	30	40	50	125	245	
%	°	fs	5	10	15	20	25	30	40	50	125	245	%
15	9	1,0112	5,1	10,1	15,2	20,2	25,3	30,3	40,4	50,6	126,4	247,7	15
20	11	1,0198	5,1	10,2	15,3	20,4	25,5	30,6	40,8	51,0	127,5	249,9	20
25	14	1,0308	5,2	10,3	15,5	20,6	25,8	30,9	41,2	51,5	128,8	252,5	25
30	17	1,0440	5,2	10,4	15,7	20,9	26,1	31,3	41,8	52,2	130,5	255,8	30
35	19	1,0595	5,3	10,6	15,9	21,2	26,5	31,8	42,4	53,0	132,4	259,6	35
40	22	1,0770	5,4	10,8	16,2	21,5	26,9	32,3	43,1	53,9	134,6	263,9	40
45	24	1,0966	5,5	11,0	16,4	21,9	27,4	32,9	43,9	54,8	137,1	268,7	45
50	27	1,1180	5,6	11,2	16,8	22,4	28,0	33,5	44,7	55,9	139,8	273,9	50
60	31	1,1662	5,8	11,7	17,5	23,3	29,2	35,0	46,6	58,3	145,8	285,7	60
70	35	1,2207	6,1	12,2	18,3	24,4	30,5	36,6	48,8	61,0	152,6	299,1	70
80	39	1,2806	6,4	12,8	19,2	25,6	32,0	38,4	51,2	64,0	160,1	313,8	80
90	42	1,3454	6,7	13,5	20,2	26,9	33,6	40,4	53,8	67,3	168,2	329,6	90
100	45	1,4142	7,1	14,1	21,2	28,3	35,4	42,4	56,6	70,7	176,8	346,5	100
110	48	1,4866	7,4	14,9	22,3	29,7	37,2	44,6	59,5	74,3	185,8	364,2	110
120	50	1,5620	7,8	15,6	23,4	31,2	39,1	46,9	62,5	78,1	195,3	382,7	120
130	52	1,6401	8,2	16,4	24,6	32,8	41,0	49,2	65,6	82,0	205,0	401,8	130
140	54	1,7205	8,6	17,2	25,8	34,4	43,0	51,6	68,8	86,0	215,1	421,5	140
150	56	1,8028	9,0	18,0	27,0	36,1	45,1	54,1	72,1	90,1	225,3	441,7	150

Fuente: FAO, 2004

El cuadro proporciona las distancias corregidas para algunas distancias horizontales, en función de la inclinación. Ejemplo: Para una distancia horizontal de 20 metros, con

una inclinación de 30%, la distancia corregida es de 20,9 m.

Anexo 2. Formulario de Inventario Forestal

Responsable: _____ Fecha: _____

Hora de inicio: _____ Hora de finalización: _____

Propiedad #: _____ Estrato #: _____

Parcela #: _____

Árbol #	dap	Altura				Árbol #	dap	Altura			
		Superior	Inferior	Escala	Distancia			Superior	Inferior	Escala	Distancia
1						21					
2						22					
3						23					
4						24					
5						25					
6						26					
7						27					
8						28					
9						29					
10						30					
11						31					
12						32					
13						33					
14						34					
15						35					
16						36					
17						37					
18						38					
19						39					
20						40					

Observaciones (ej. Tratamientos silvícolas):

Anexo 3. Formulario para colecta de información de biomasa aérea

Responsable: _____ Fecha: _____

Hora de inicio: _____ Hora de finalización: _____

Propiedad #: _____ Estrato #: _____ Parcela #: _____

Árbol #: _____ dap: _____ Altura: _____

Sección #	Peso Fuste	Peso Ramas	Peso Hojas	Peso Frutos	Observaciones
	kg (Materia Viva)				
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
Peso de la Muestra					

Anexo 4. Ecuaciones Alométricas para especies agroforestales

Clasificación general	Grupo de especies	Ecuación Alométrica	Autores	Origen de la Información	Diámetro máximo
Árboles de sombra agroforestales	General	$\text{Log}_{10}\text{Biomass} = -0.834 + 2.223 (\text{log}_{10}\text{dbh})$	Segura et al. 2006	Nicaragua	44cm
Árboles de sombra agroforestales	<i>Inga spp.</i>	$\text{Log}_{10}\text{Biomass} = -0.889 + 2.317 (\text{log}_{10}\text{dbh})$	Segura et al. 2006	Nicaragua	44cm
Árboles de sombra agroforestales	<i>Inga punctata</i>	$\text{Log}_{10}\text{Biomass} = -0.559 + 2.067 (\text{log}_{10}\text{dbh})$	Segura et al. 2006	Nicaragua	44cm
Árboles de sombra agroforestales	<i>Inga tonduzzi</i>	$\text{Log}_{10}\text{Biomass} = -0.936 + 2.348 (\text{log}_{10}\text{dbh})$	Segura et al. 2006	Nicaragua	44cm
Árboles de sombra agroforestales	<i>Juglans olanchana</i>	$\text{Log}_{10}\text{Biomass} = -1.417 + 2.755 (\text{log}_{10}\text{dbh})$	Segura et al. 2006	Nicaragua	44cm
Árboles de sombra agroforestales	<i>Cordia alliodora</i>	$\text{Log}_{10}\text{Biomass} = -0.755 + 2.072 (\text{log}_{10}\text{dbh})$	Segura et al. 2006	Nicaragua	4cm
Cafe sombreado	<i>Coffea arabica</i>	$\text{Biomass} = \exp(-2.719 + 1.991 (\ln(\text{dbh}))) (\text{log}_{10}\text{dbh})$	Segura et al. 2006	Nicaragua	8cm
Cafe podado	<i>Coffea arabica</i>	$\text{Biomass} = 0.281 \times \text{dbh}^{2.06}$	Van Noordwijk et al. 2002	Java, Indonesia	10cm
Banana	<i>Musa paradisiaca</i>	$\text{Biomass} = 0.030 \times \text{dbh}^{2.13}$	Van Noordwijk et al. 2002	Java, Indonesia	28cm
Pejibaye	<i>Bactris gasipaes</i>	$\text{Biomass} = 0.97 + 0.078 \times \text{Ba} - 0.00094 \times \text{Ba}^2 + 0.0000065 \times \text{Ba}^3$	Schroth et al. 2002	Amazonia	2–12cm
Caucho	<i>Hevea brasiliensis</i>	$\text{Biomass} = -3.84 + 0.528 \times \text{Ba} + 0.001 \times \text{Ba}^2$	Schroth et al. 2002	Amazonia	6–20cm
Naranja	<i>Citrus sinensis</i>	$\text{Biomass} = -6.64 + 0.279 \times \text{Ba} + 0.000514 \times \text{Ba}^2$	Schroth et al. 2002	Amazonia	8–17cm
Castaña	<i>Bertholletia excelsa</i>	$\text{Biomass} = -18.1 + 0.663 \times \text{Ba} - 0.000384 \times \text{Ba}^2$	Schroth et al. 2002	Amazonia	8–26cm

Fuente: Person et al. 2005

Anexo 5. Programas de computación

Anexo 5.1. Programas para análisis de stocks de carbono

De acuerdo con Zamora-López (2006), existen diversos programas de computación simuladores para el cálculo de los flujos de carbono en nivel de ecosistemas. Entre ellos están CO₂Fix y CO₂Land, CAMFor, Gorcam, TRIPLEX, CQUEST y el FullCAM. En esta sección presentaremos el programa CO₂Fix, ya que este es el más reciente y está disponible para acceso gratuito.

CO₂Fix - Desarrollado por ALTERRA (Universidad de Wageningen, Holanda), Instituto de Ecología de la Universidad de México (México), CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica) y el Instituto de Bosques Europeo (EFI, Finlandia), en el ámbito del proyecto CASFOR. El CO₂FIX fue diseñado para simular la dinámica de carbono en sistemas forestales, lo que limita su aplicación a otros usos de la tierra. El programa se divide en cinco módulos: biomasa, suelo, productos, financiero y cálculo de créditos. Para su funcionamiento se necesita determinar parámetros específicos para cada uno de los módulos. El programa presenta los resultados en forma de tablas y gráficos. El programa en versión 3.1 y el manual están disponibles en el Sitio Web:

<http://www.efi.int/projects/casfor/models.htm>

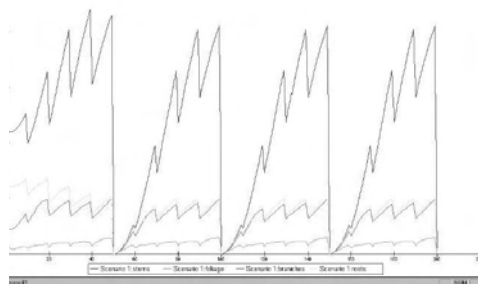


Figura 53. Resultado gráfico de stocks de carbono en diferentes compartimentos

Anexo 5.2. Programa para manejo y simulación de crecimiento de especies forestales

Silvia (Sistema de Manejo forestal) - es un programa desarrollado por el CATIE, que presenta herramientas para el manejo técnico, sostenible y administración de plantaciones forestales. El programa permite abordar los principales aspectos del manejo forestal, entre ellos la simulación del inventario actual del crecimiento de un rodal o grupos de rodales. El programa contiene una referencia de datos de ecuaciones de crecimiento de especies

Variable	Dg	T	S	II
Volumen	77	225	240	247
Número	245	156	730	7144

Figura 54. Módulo de Ecuaciones Silvia

forestales. La estructura del programa es visual y totalmente orientada al usuario, de quien solamente se requiere un conocimiento general del sistema operativo Windows para su acceso y manejo. Las simulaciones se realizan mediante ecuaciones calculadas por el usuario o seleccionadas de la literatura.

El programa está Disponible en el Sitio Web:

<http://www.silviaforestal.com>.

Anexo 5.3. Programa para aplicación de metodologías A/R

Selector de metodologías MDL aprobadas

Elaborada por el Proyecto Forma, el Asistente MDL de CATIE, es una guía práctica para la selección de metodologías aprobadas y adecuadas para el diseño de un proyecto forestal de remoción de carbono mediante el reforestación de acuerdo con las reglas del MDL.

El programa esta disponible en el Sitio Web:

www.proyectoforma.com.



Figura 55. Módulo selector de metodologías MDL aprobadas

Aplicación de Metodologías A/R TARAM (Tool for Afforestation and Reforestation Approved Methodologies) - Elaborada por el Fondo BioCarbono del Banco Mundial, con apoyo del Proyecto Forma, el TARAM es una herramienta para la aplicación de metodologías A/R. El programa es un práctico instrumento de hoja de cálculo (Excel) que contribuye con los elaboradores de proyectos a utilizar las ecuaciones contenidas en las metodologías de línea referencia y monitoreo aprobadas.

El programa está disponible en el Sitio Web: www.proyectoforma.com.

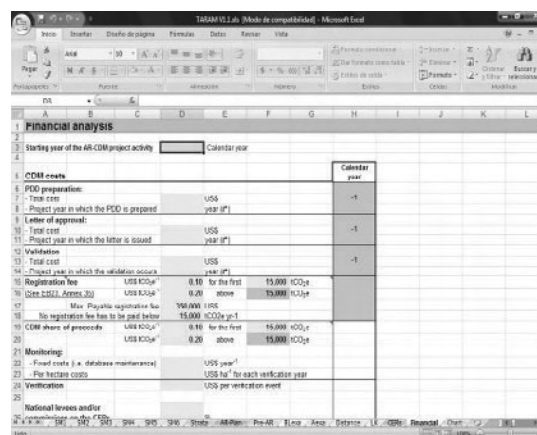


Figura 56. Módulo financiero TARAM

Anexo 5.4. Programa para determinación de tamaño de muestras

El Winrock Terrestrial Sampling Calculator, es una planilla de Excel desarrollada por el Winrock International utilizada para determinar el número de parcelas. La herramienta también estima el costo de realización del muestreo. El formato puede ser usada en la determinación del número de parcelas necesarias para el escenario de referencia (línea referencia), así como para monitoreo.

El programa esta disponible en el Sitio Web:

http://www.winrock.org/Ecosystems/files/Winrock_Sampling_Calculator.xlsb



Figura 57. Planilla para determinación de tamaño de muestras Winrock

Anexo 6. Transformaciones de ecuaciones alométricas

En general, al graficar una cantidad de datos representativos de DAP en función de la altura o biomasa de arboles se presenta una tendencia no lineal, en la cual, la nube de puntos muestra un problema de heterocedasticidad reflejada en incremento de la varianza con el aumento del diámetro, como presentado por Zapata et al. (2003) en la Figura 58.

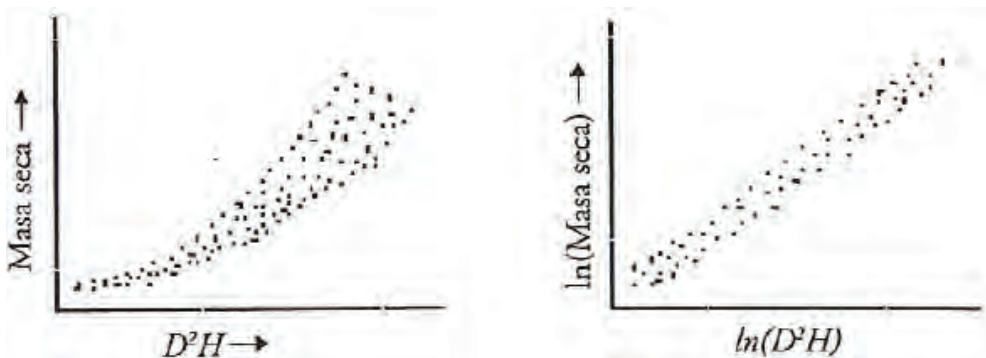


Figura 58. La biomasa en función del diámetro y la altura, sin y con transformación logarítmica.

Fuente: Zapata et al. (2003) citando Bell et al. (1984).

La figura a la izquierda ilustra la tendencia heterocedástica de los datos de biomasa seca sin la transformación logarítmica con el incremento de la variable DAP²H. La figura a la derecha ilustra la regresión lineal en escala logarítmica.

Quando sea necesario, se realizan transformaciones (modificaciones) de los modelos de regresión con el objetivo de seleccionar el que mejor se ajusta a los datos. En este procedimiento son elaborados diagramas de dispersión entre todas las variables. Inicialmente se grafican las variables dependientes originales y transformadas, posteriormente con las variables independientes transformadas y, por último transformando todas las variables. Caso que existan anomalías, se procede con las transformaciones del modelo. Las anomalías pueden ser detectadas por medio del gráfico de residuos³¹ con referencia en las variables independientes. A seguir se presenta un ejemplo de gráfico de residuos con y sin anomalías (figura 59).

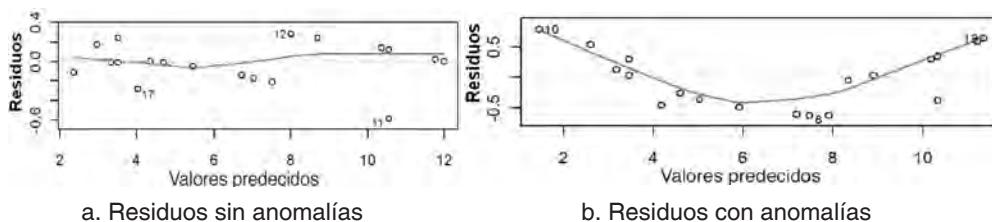


Figura 59. Ejemplo de gráficos de dispersión de residuos sin y con anomalía

La distribución de los residuos resulta satisfactoria cuando en él no se evidencian tendencias anómalas ni heterogeneidad de la varianza.

Montero y Montagnini (2005) citando a Sprugel (1983) indican que todos los modelos alométricos con transformaciones logarítmicas deben ser corregidos por un factor de corrección (FC). El resultado obtenido al usar cualquier modelo debe ser multiplicado por el FC de cada uno. La ecuación para calcular el FC sugerida por los autores es la siguiente:

$$FC = \exp^{(SE^2 / 2)}$$

Donde:

FC es el factor de corrección

SE es el error estimado por la regresión.

Como criterio de selección entre un grupo de ecuaciones de regresión ajustadas y otro grupo de ecuaciones no ajustadas, se utiliza el Índice de Furnival (IF). El IF es considerado como una desviación transformada, en este caso, para las unidades de

³¹ Los residuos son las distribuciones de valores muestreados calculados como la diferencia entre el valor de la variables respuesta y el estimado del modelo de regresión. La distribución de residuos es importante como indicador del cumplimiento de las condiciones de aplicación de las técnicas de correlación, así como de la bondad del ajuste.

biomasa aérea total. Se utiliza este índice para considerar que la desviación estándar de las variables dependientes están expresadas en diferentes unidades (Arreaga Gramajo 2002 citando a Ferreira 1990). Excluyendo el coeficiente de determinación ajustado, el criterio general de selección de la ecuación consiste en identificar aquel cuyo índice (IF) tiende a cero.

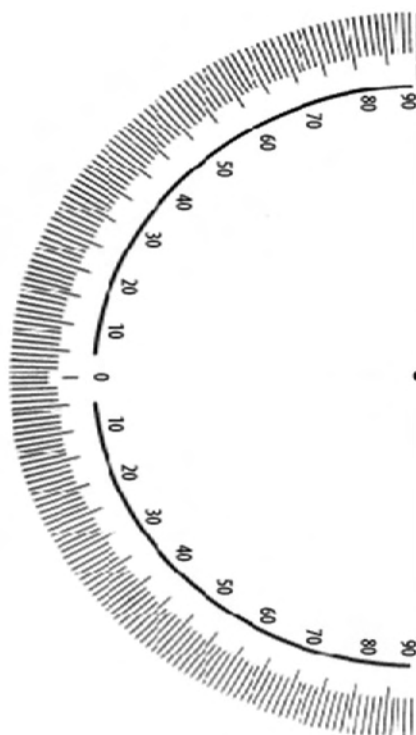
Anexo 7. Formato clinómetro de papel³²

Tabela. Altura a partir de las distancias y ángulos determinados s determinados

Grados (°)	Distancia (m)					
	10	15	20	25	30	35
1	0,17	0,26	0,35	0,44	0,52	0,61
2	0,35	0,52	0,70	0,87	1,05	1,22
3	0,52	0,79	1,05	1,31	1,57	1,83
4	0,70	1,05	1,40	1,75	2,10	2,45
5	0,87	1,31	1,75	2,19	2,62	3,06
6	1,05	1,58	2,10	2,63	3,15	3,68
7	1,23	1,84	2,46	3,07	3,68	4,30
8	1,41	2,11	2,81	3,51	4,22	4,92
9	1,58	2,38	3,17	3,96	4,75	5,54
10	1,76	2,64	3,53	4,41	5,29	6,17
15	2,68	4,02	5,36	6,70	8,04	9,38
20	3,64	5,46	7,28	9,10	10,92	12,74
25	4,66	6,99	9,33	11,66	13,99	16,32
30	5,77	8,66	11,55	14,43	17,32	20,21
35	7,00	10,50	14,00	17,50	21,01	24,51
40	8,39	12,59	16,78	20,98	25,17	29,37
45	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00	35,00
50	11,92	17,88	23,83	29,79	35,75	41,71
55	14,28	21,42	28,56	35,70	42,84	49,98
60	17,32	25,98	34,64	43,30	51,96	60,62
65	21,44	32,17	42,89	53,61	64,33	75,05
70	27,47	41,21	54,95	68,68	82,42	96,16
75	37,32	55,98	74,63	93,29	111,95	130,61
80	56,71	85,06	113,41	141,76	170,12	198,47
85	114,27	171,40	228,54	285,67	342,80	399,94
90						

Fórmula para medir alturas no disponibles en la tabla:

$$H = \text{tang.}(X) * \text{distancia}$$



Se recomienda no usar ángulos mayores a 45°.

³⁴ Figura tomada de <http://www.learner.org/channel/workshops/lala/images/clinometer.gif>



World Agroforestry Centre
TRANSFORMING LIVES AND LANDSCAPES

El mercado internacional de carbono pasó a ser una realidad jurídica y práctica con la entrada en vigor del Protocolo de Kioto. Además del mercado asociado al cumplimiento del protocolo, mecanismos adicionales de mercados (voluntarios y paralelos) generan oportunidades para complementar los ingresos provenientes de las actividades forestales a través de la venta de certificados de créditos de carbono, a la vez que contribuyen a mitigar el cambio climático. Entretanto, las metodologías y procedimientos para comprobar la captura y el almacenamiento de carbono por proyectos forestales son considerados engorrosos y aún más complicado seguir los procesos de negociación de estos créditos. Tales limitaciones son todavía mayores en el caso de pequeños y medianos productores rurales que desconocen el potencial para el secuestro y almacenamiento de carbono en sus propiedades, así como, las modalidades de proyectos y componentes elegibles y los procedimientos necesarios para negociar créditos de carbono en los respectivos mercados.

Tomando en cuenta estas consideraciones, esta publicación se dirige a técnicos y agentes de desarrollo involucrados en proyectos que buscan promover la inserción de comunidades rurales y productores familiares en mercados de carbono. La guía presenta los procedimientos utilizados para la medición en campo de biomasa aérea y subterránea, y del carbono orgánico del suelo en plantaciones forestales, sistemas agroforestales, bosques y otros usos del suelo como pasturas y cultivos agrícolas.

En un momento en que la utilización sostenible de áreas abiertas en la Amazonía adquiere carácter de urgencia, se espera que esta publicación del Centro Mundial Agroforestal pueda contribuir con los objetivos de asociaciones de productores, comunidades y demás grupos informales involucrados en la búsqueda de alternativas agroforestales para la mejoría de su bienestar.

Con el apoyo:



World Agroforestry Centre – ICRAF
Amazon Regional Programme
Avenida La Molina 1895. Apartado 1558. Lima 12, Perú
www.worldagroforestry.org