



USAID
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA



Programa Regional de Cambio Climático

Síntesis técnica

Revisión del número de estratos de bosque y su impacto en el error de estimación del nivel de referencia de emisiones de deforestación, y recomendaciones sobre la intensidad de muestreo para el establecimiento de parcelas temporales en bosques secundarios y maduros en Costa Rica

Fernando Casanoves
Mayra Alejandra Ospina
Sergio Vílchez Mendoza

2017

Contenido

Índice de cuadros	III
Índice de figuras.....	III
1. Introducción.....	V
2. Alcances del informe.....	6
3. Productos	7
Revisión de literatura	7
Diseño de muestreo.....	7
Estimación de biomasa y carbono.....	12
Evaluación de la degradación	16
Descripción de los procedimientos estadísticos.....	17
Calidad de las bases de datos	17
Depuración de las bases de datos.....	18
Estimación de biomasa y carbono.....	19
Determinación de la calidad de las estratificaciones.....	20
Estimaciones de biomasa usando métodos alternativos.....	24
Propuestas para la mejora de las estratificaciones	28
Relación entre variables estructurales y biomasa	33
4. Referencias bibliográficas.....	38

Índice de cuadros

Cuadro 3.1. Ecuaciones alométricas para la obtención de biomasa usando DAP para especies y tipos de bosques comunes en los bosques de Costa Rica.....	11
Cuadro 3.2: Códigos asignado para cada una de las razones para omitir casos usando la variable Bloqueo en la base de datos INFCostaRica.xlsx.....	16
Cuadro 3.3: Ecuaciones usadas para la estimación de biomasa aérea en este estudio....	22
Cuadro 3.4: Abundancias por cada hábito de crecimiento en el INF de Costa Rica	23
Cuadro 3.5. Estimación de biomasa aérea por estrato y su incertidumbre para los estratos definidos por el IFN de Costa Rica.....	24
Cuadro 3.6. Estimación de biomasa aérea por estrato y su incertidumbre para los estratos definidos por la serie historia de los NREF de Costa Rica.....	24
Cuadro 3.7: Estimación de biomasa aérea por estrato y su incertidumbre para los estratos utilizados son los obtenidos de la serie historia de los NREF con las estimaciones realizadas en este estudio	25
Cuadro 3.8. Diferencia porcentual en las estimaciones e incertidumbres por estrato utilizando los resultados de la biomasa estimada por el INF de CR y la biomasa estimada en este estudio con base en los estratos obtenidos de la serie historia de los NREF.....	25
Cuadro 3.9. Area de los tipos de bosque del INF de Costa Rica	26
Cuadro 3.10. Resultados obtenidos del análisis de varianza para la variable biomasa utilizando la sub-estratificación a partir de capas de información geográfica.....	27
Cuadro 3.11.. Comparación de medias por zona de vida para el estrato Bosque maduro	27
Cuadro 3.12. Comparación de medias por área protegida y no protegida, para los estratos Bosque maduro y Bosque secundario	27
Cuadro 3.13.. Estimación de la biomasa y su incertidumbre para los estratos Bosque maduro y Bosque secundario utilizando la subestratificación por área protegida.....	28
Cuadro 3.14.. Estimación de la biomasa e incertidumbre y cálculo del tamaño muestral necesario para una incertidumbre del 10 %y 15%.....	28
Cuadro 3.15. Comparación de medias LSD de Fisher para la variable biomasa. Los estratos utilizados son la agrupación realizada por este estudio	29
Cuadro 3.16. Estimación de la biomasa e incertidumbre y cálculo del tamaño muestral necesario para una incertidumbre del 10 % y 15%. Utilizando los estratos definidos por este estudio.....	30
Cuadro 3.17. Coeficientes de correlación de Pearson entre biomasa y el resto de variables alométricas evaluadas en el INF de Costa Rica.....	31
Cuadro 5.1Intervalos de confianza con Bootstrap	Error! Bookmark not defined.

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de dispersión entre Altura y DAP para detectar datos atípicos en esta relación.....	17
Figura 2. Dendrograma obtenido a través de la prueba de comparación de medias multivariadas DGC. Los estratos comparados son los obtenidos del IFN de CR usando las variables biomasa, DAP, DMC, altura, AB, densidad y volumen.....	19
Figura 3. Dendrograma obtenido a través de la prueba de comparación de medias multivariadas DGC. Los estratos comparados son los obtenidos a través de la serie historia de los NREF usando las variables biomasa, DAP, DMC, altura, AB, densidad y volumen.....	20
Figura 4. Dendrograma obtenido a través de la prueba de comparación de medias DGC ($p < 0.05$) de la variable biomasa usando los estratos del IFN de Costa Rica.....	21
Figura 5. Dendrograma obtenido a través de la prueba de comparación de medias DGC ($p < 0.05$) de la variable biomasa usando los estratos de la serie historia de los NREF para Costa Rica.....	22
Figura 6. Comparación de medias DGC para la variable biomasa utilizando los estratos definidos a partir de la serie histórica de los NREF y el subdominio área protegida.....	29
Figura 7. Comparación de medias multivariadas (DGC) para los estratos propuestos por este estudio.....	30
Figura 8. Diagramas de dispersión mostrando la relación entre biomasa y las diferentes variables estructurales obtenida a nivel de parcela, considerando todas las parcelas del inventario forestal nacional de Costa Rica.....	32
Figura 9. Gráficos Biplot obtenidos mediante un análisis de componentes principales de las variables estructurales y biomas para cada uno de los bosque usando la clasificación ...a) y la clasificación ...b) considerando todas las parcelas del inventario forestal nacional de Costa Rica.....	1

1. Introducción

En el marco de la Estrategia Nacional de Cambio Climático de Costa Rica se han impulsado múltiples acciones como la carbono neutralidad, que fue ratificada en su Contribución Determinada Nacionalmente Prevista (INDC; Gobierno de Costa Rica 2015) ante la CMNUCC y Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas (NAMA) en los sectores energía, agricultura y café (esta última ya en operación). Además, para el sector de LULUCF, una Estrategia Nacional REDD+ se completó y sus componentes están en evolución desde antes de 2011¹, cuando el país presentó su propuesta de preparación para el proceso (R-PP). En el “Documento de idea de proyecto para el programa de reducción de emisiones” (ER-PIN), presentado en 2013 ante el FCPF (FONAFIFO 2013), el país describe la deforestación evitada y la mejora en las existencias de carbono como las prioridades nacionales del programa de reducción de emisiones del país. Para alcanzar esta meta se propone la ampliación del actual sistema de PSA que maneja FONAFIFO para bosques maduros y secundarios en tierras privadas, la promoción de la restauración de bosques secundarios y el establecimiento de sistemas agroforestales, y la promoción del uso de madera sostenible de los bosques. Esas actividades, y otras complementarias, resultan en una reducción de emisiones cercana a las 24.5 millones de toneladas de CO₂.

Como uno de los pasos siguientes en este proceso, en noviembre de 2015, Costa Rica presentó su nivel de referencia de emisiones forestales/nivel de referencia forestal (NREF/NRF) para REDD+ ante la CMNUCC (Pedroni et al. 2015). En una primera versión de dicho documento, se incluyeron las emisiones por deforestación, el incremento en las reservas de carbono, la conservación de esas reservas y se excluyeron las emisiones por degradación y las relacionadas al manejo forestal sostenible (MFS). Las revisiones del comité técnico dan fe que la información enviada por Costa Rica es completa, transparente y que está de acuerdo con los lineamientos de la Convención. Además, se mencionan algunas áreas de mejora (FCPF 2015).

Como parte de esas mejoras requeridas, y basándose en la asistencia técnica previa brindada por el Programa Regional de Cambio Climático de USAID, a través de CATIE, éste está respondiendo a una solicitud adicional por parte de la Secretaría REDD+ de Costa Rica, como unidad ejecutora, para generar análisis complementarios que permitan a Costa Rica concretar la negociación de su programa de emisiones. En particular, la Unidad de Bioestadística de CATIE se puso a disposición de FONAFIFO para 1) revisar el número de estratos de bosque y su impacto en el error de estimación del nivel de referencia de emisiones de deforestación en Costa Rica y 2) recomendar la intensidad de muestreo necesaria para mejorar los estimados de biomasa y carbono de bosques secundarios y maduros del país. La Secretaría REDD+ facilitó al CATIE los datos del inventario nacional forestal (INF) de Costa Rica para efecto de los análisis descritos a continuación, en calidad de préstamo, para uso exclusivo de este estudio. El CATIE se comprometió a no distribuir ni guardar copia de los mismos para ningún otro fin, sin la debida autorización del SINAC.

¹ En julio de 2008 Costa Rica fue integrada oficialmente al proceso REDD+ del FCPF.

Producto del trabajo estadístico realizado se presenta este documento, el cual describe en detalle los procedimientos estadísticos realizados, incluyendo los pasos para la depuración de la base de datos del INF, las estimaciones de biomasa y carbono y los análisis para determinar la calidad de la estratificación actual y posibilidades de mejora, así como recomendaciones de mejora para mejorar los estimados de biomasa y carbono del país y atender las observaciones recibidas durante la revisión técnica de los NRF/NREF.

2. Alcances del informe

Los objetivos planteados según el acuerdo entre FONAFIFO y el CATIE son los siguientes:

- Usando los datos del INF de Costa Rica, proponer un diseño de muestreo que permita abordar y reducir la incertidumbre asociada a las estimaciones de carbono y emisiones asociadas a la categoría de bosque secundario y el proceso de degradación forestal señaladas durante la revisión técnica del NRF/NREF.
- Determinar, mediante análisis estadísticos exhaustivos, el número mínimo aceptable de estratos de bosque que provean el menor error en la estimación de emisiones por deforestación y mejora de reservas de carbono.
- Realizar un análisis estadístico que permita determinar si es posible detectar, a partir de los datos del INF, cambios en las existencias de carbono en la categoría de bosques que permanecen como bosques (degradación) en el NRF/NREF de Costa Rica.

Como productos esperados de este proceso, se tienen:

1. Documento técnico que describa un diseño de muestreo estadísticamente robusto que permita estimar las existencias de carbono y las emisiones asociadas al crecimiento de los bosques secundarios y bosques que se mantienen como bosques, y los procesos de degradación forestal documentados como parte del INF y los NRF/NREF de Costa Rica. El documento debe incluir al menos:
 - a. Revisión de literatura que documente diferentes opciones metodológicas para estimar las existencias de carbono y las emisiones asociadas al crecimiento de los bosques secundarios y bosques que se mantienen como bosque, y los procesos de degradación forestal.
 - b. Recomendaciones, basadas en el análisis de los datos del INF, para el establecimiento de parcelas temporales para documentar lo anterior: diseño/forma, variables a recopilar, identificación de estratos, intensidad de muestreo por estrato, entre otras aplicables.
 - c. Descripción de los procedimientos estadísticos y la ruta de análisis para cuantificar la relación entre la biomasa y otras variables estructurales de los bosques con el porcentaje de cobertura de copas, que permita al personal técnico de FONAFIFO actualizar los cálculos posteriormente.

2. Documento técnico que describa el proceso, los análisis y herramientas estadísticas y los resultados obtenidos para determinar si es posible detectar procesos de degradación forestal a partir de los datos del INF de Costa Rica.
3. Artículo técnico-científico enviado a una revista indexada donde se describan los procedimientos y análisis estadísticos necesarios para calcular el número mínimo aceptable de estratos de bosque en el INF de Costa Rica para minimizar el error en la estimación de emisiones asociada al nivel de referencia forestal y al nivel de referencia de emisiones forestales (NRF/NREF) del país.

Por efectos prácticos los dos primeros productos se consolidaron en este único documento.

3. Opciones metodológicas

Para estimar existencias de carbono y las emisiones asociadas a la dinámica de crecimiento y degradación forestal es necesario desarrollar capacidades en una diversidad de áreas del conocimiento y herramientas de análisis. La revisión de literatura que se presenta a continuación es una síntesis de las buenas prácticas estadísticas relacionadas con la planificación del trabajo y de los cálculos de las existencias y la dinámica de la biomasa y el carbono en los bosques de un INF solamente. No pretende ser un tratamiento exhaustivo del tema porque hay otros manuales de buenas prácticas dedicados exclusivamente al tema (GOFC-GOLD 2015; Casanoves et al. 2017, entre otros), ni aborda los componentes geoespaciales de estos procesos.

3.1 Diseño de muestreo

Actualmente se están desarrollando proyectos relacionados con la reducción y mitigación de emisiones de CO₂ a la atmósfera. Para ello se han utilizado los inventarios forestales nacionales (INF) como herramientas de medición y evaluación de la cantidad y el estado del bosque. Cuando se tiene áreas con diversas características, como ocurre en los paisajes forestales formados por distintos tipos de bosque o en paisajes agrícolas con diferentes usos de la tierra, el muestreo estratificado es adecuado, ya que permite ser eficiente en tiempo y costo de muestreo (IPCC 2006, FCPF 2013, GOFC-GOLD 2015, Casanoves et al. 2017).

El diseño de muestreo incluye a la definición del plan de muestreo y a la forma y tamaño de las unidades de muestreo y submuestreo. Para ello es necesario definir la o las variables de interés, ya que el esfuerzo de muestreo dependerá de la variabilidad de cada una de estas variables en la población (o en el estrato; UNFCCC 2015). Los inventarios forestales pueden ser diseñados para múltiples propósitos (estimación de biomasa y carbono, estimación de volúmenes maderables, evaluación de la biodiversidad, evaluación de los tipos de coberturas y estado del bosque, entre otras); dependiendo del propósito se definen las variables de interés que son las que se utilizarán para establecer el diseño de muestreo. En inventarios forestales para desarrollo de proyectos REDD+, una de las principales variables de interés es la biomasa, la cual generalmente no tiene una distribución homogénea. La varianza de esta variable puede deberse a factores edafoclimáticos (clima y suelo), de manejo o intervención

antrópica (aprovechamiento, cambios de uso de suelo, restauración asistida), biológicos (edad, diversidad, composición) y perturbaciones naturales (huracanes, plagas y enfermedades, inundaciones); estos factores pueden definir los tipos de coberturas presentes en el paisaje forestal (GOFC-GOLD 2009).

Es por esta complejidad en el sistema que el muestreo estratificado es el más apropiado, ya que en una estratificación óptima la varianza entre unidades muestrales de un mismo estrato es mínima y la varianza entre los estratos es máxima. Usualmente en los inventarios forestales los estratos en un plan de muestreo estratificado son los tipos de bosque, y son definidos a partir de información obtenida a través de muestreos y mapas de información geográfica y de vegetación (MacDicken 1997). Las etapas de un diseño de muestreo generalmente son: la definición de estratos a partir de información secundaria (mapas de cobertura, uso de la tierra, zonas de vida, información climática, etc.), estimación de un proxy de la varianza a partir de un muestreo piloto, corrección y definición de los estratos y cálculo del número de unidades muestrales (MacDicken 1997, Pearson et al. 2005). También es importante definir el plan de muestreo dentro de cada estrato. En inventarios forestales, la unidad de observación principal es el árbol, pero es imposible tener un marco de muestreo para ellos. Por este motivo se realizan muestreos por conglomerado, donde el conglomerado es una parcela cuadrada, rectangular o circular donde se censan todos los árboles con un DAP mayor a un valor predeterminado (generalmente mayor a 5 cm, 10 cm o 20 cm; Scheaffer et al. 1987). Dependiendo de la variabilidad en el estrato, a veces se realizan conglomerados en dos etapas, es decir, se define un área grande como conglomerado, pero este no se censa por completo, sino que se censan los subconglomerados (Zarcovh y Bechtold 2000).

Por último, dentro de cada estrato se debe definir la forma de selección de las unidades de muestreo (conglomerados). Esta puede realizarse mediante un muestreo sistemático o un muestreo aleatorio. La selección de esta estrategia depende de la homogeneidad del estrato en particular. Si el estrato es homogéneo, es decir que para la variable de interés se tienen valores similares de medias y varianzas a lo largo de todo el estrato, la varianza de las estimaciones será igual usando un muestro aleatorio o sistemático. En cambio, si existe algún tipo de gradiente, el muestreo estratificado es recomendado ya que produce estimadores con menos varianza (MacDicken 1997). Este muestro sistemático es el más usado en inventarios forestales debido a que no solo facilita la identificación de las parcelas, sino que, al estar generalmente dispuestos en forma de grilla regular, facilita la confección de mapas y definición de áreas a partir de las estimaciones obtenidas.

Una vez definido el plan de muestreo es necesario definir la forma y tamaño de la unidad de muestreo o parcela. La forma y tamaño de la parcela dependen de la variable de interés y la varianza; para el caso de inventarios forestales para la evaluación de la biodiversidad las parcelas rectangulares o transectos pueden ser adecuadas. En el caso de inventarios para la estimación de biomasa y carbono, las parcelas cuadradas o circulares son las más recomendables. Además de la variable de interés, otro de los factores a tener en cuenta para la definición de la forma de la parcela es la facilidad de establecimiento en campo, los costos de establecimiento y las condiciones del terreno (UNFCCC 2015). El tamaño de la parcela depende de la unidad de medición; en el caso de inventarios para la estimación de volumen, biomasa y carbono la unidad de medición principal son los árboles. Estos usualmente se

clasifican en tres grupos por tamaño: fustales (árboles con dap mayor a 10 cm), latizales (árboles con dap menor a 10 cm y una altura mayor a 1.5 m) y brinzales (árboles con altura menor a 1.5 m). El tamaño de la unidad de medición define así el tamaño de la parcela, árboles grandes en parcelas grande y árboles pequeños en parcelas pequeñas (Casanoves et al. 2017).

Diseño estratificado

El objetivo de un diseño de muestreo estratificado es minimizar la varianza entre unidades de muestreo dentro de un estrato (por ejemplo, el tipo de bosque) para la o las variables de mayor interés. Pero, en algunos casos la variabilidad de la variable objetivo es tal que no es posible definir áreas homogéneas, dificultando la delimitación de los estratos o necesitando numerosos estratos para contemplar esta falta de homogeneidad. La definición de muchos estratos, aunque puede ayudar a obtener varianzas menores, disminuye el número de unidades muestrales por estrato y esto afecta a las incertidumbres de las estimaciones (IPCC 2006). Por ejemplo, las plantaciones forestales pueden estar definidas en un único estrato (plantación forestal) o definidas en varios estratos basados en la especie y la edad de la plantación. Una estratificación muy fina, como sería el caso de estratos de plantación por especie y edad, podría aumentar los costos de levantamiento de la información ya que se requeriría tener un mayor número de parcelas totales para tener una estimación suficiente de cada estrato. La especificidad con la que se definan los estratos debe basarse en el interés del inventario y debe ser costo-efectiva. En muchos casos puede ser mejor definir un único estrato (plantación forestal) y medir, adicionalmente, covariables que permitan controlar la varianza presente en el estrato (UNFCCC 2015).

Se denomina muestreo estratificado a un plan de muestreo en el que la población es dividida en L estratos y donde, de cada h-ésimo estrato, se selecciona una muestra aleatoria simple o sistemática de tamaño n_h (Balzarini et al. 2008). El tamaño de muestra dentro de un estrato puede obtenerse de diferentes formas en función del objetivo del inventario, de las hipótesis principales a evaluar o de las estimaciones a realizar, de la cantidad de información previa disponible y de los costos en el levantamiento de la información. Debido a la magnitud de un INF, generalmente se usan fórmulas de cálculo del esfuerzo muestral que involucran el tamaño del estrato, la varianza de la principal variable de interés y los costos de levantamiento de datos en los diferentes estratos:

La asignación óptima teniendo en cuenta los costos (n fijo) es la correcta si el costo de levantamiento de una unidad de muestreo es diferente para cada estrato:

$$n_h = \frac{\sigma_h N_h / \sqrt{C_h}}{\sum_{h=1}^L \sigma_h N_h / \sqrt{C_h}} n$$

donde:

n_h : número de unidades muestrales del h-ésimo estrato

σ_h : desviación estándar del h-ésimo estrato

- N_h : número total de unidades muestrales contenidas en el h-ésimo estrato
- n : tamaño de la muestra
- C_h : costo de levantamiento de una unidad muestral en el h-ésimo estrato

La asignación óptima teniendo en cuenta los costos (costo total fijo) es la adecuada si el costo de levantamiento de la información de una unidad de muestreo es diferente para cada estrato, y se tiene un presupuesto fijo para el muestreo:

$$n_h = \frac{\sigma_h N_h / \sqrt{C_h}}{\sum_{h=1}^L \sigma_h N_h / \sqrt{C_h}} C$$

donde:

- n_h : número de unidades muestrales del h-ésimo estrato
- σ_h : desviación estándar del h-ésimo estrato
- N_h : número total de unidades muestrales contenidas en el h-ésimo estrato
- C_h : costo de relevamiento de una unidad muestral en el h-ésimo estrato
- C : monto disponible para realizar todo el inventario

Dentro de cada estrato se calculan los estimadores de la media y del total de la siguiente forma:

Total
$$x'_h = \frac{N_h}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} x_{ih}$$

Media
$$\bar{x}_h = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} x_{ih}$$

donde:

- N_h es el tamaño del h-ésimo estrato
- n_h es el tamaño de la muestra en el h-ésimo estrato
- x_{ih} es el valor de la variable de respuesta en la i-ésima parcela del h-ésimo estrato

Por último, se calculan los estimadores de la media y del total poblacional usando las siguientes expresiones:

Total
$$x'_{me} = \sum_{h=1}^L x'_h$$

Media
$$\bar{x}_{me} = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L N_h \bar{x}_h$$

donde:

- N es el tamaño de la población

N_h es el tamaño del h-ésimo estrato

χ'_h el total estimado para la variable de respuesta en el h-ésimo estrato

\bar{x}_h es el valor medio estimado de la variable de respuesta en el h-ésimo estrato

Cuando la información obtenida del inventario forestal después de la primera medición tiene mucha variabilidad dentro de un mismo estrato, es recomendable realizar post-estratificación para corregir la pertenencia de una unidad de muestreo a un estrato.

Definición de la unidad de muestreo

El tamaño de las unidades de muestreo o parcelas debe ser definido con base en un equilibrio entre eficiencia estadística en la estimación y eficiencia en costo, tiempo y facilidad de medición. Una parcela grande captura más variabilidad dentro de la parcela y reduce la variabilidad entre parcelas; pero una parcela grande implica mayor tiempo en el establecimiento y medición de los individuos, lo que se traduce a mayor costo por parcela y menos parcelas totales para el estudio, reduciendo el tamaño de la muestra. Un tamaño de muestra pequeño puede aumentar el error estándar de la estimación y por ende los niveles de incertidumbre (UNFCCC 2015).

Además de la variabilidad dentro de la parcela, es importante tener en cuenta el tamaño de la unidad de medición. Si los árboles son de tamaño homogéneo, como es el caso de una plantación forestal, las parcelas pequeñas son más eficientes, pero si árboles varían mucho en el tamaño, como es el caso de bosques maduros, la parcela de mayor tamaño es más eficiente para captar la variabilidad. Por otro lado, medir árboles pequeños en una parcela grande podría implicar mayor esfuerzo y tiempo en la medición, aumentando los costos por parcela. Para definir el tamaño de parcela adecuado puede utilizarse una regla empírica, que establece seleccionar un tamaño de parcela que en promedio contenga como mínimo de 10 a 15 árboles (fustales) en parcelas homogéneas y entre 15 y 20 árboles en parcelas heterogéneas (Pearson et al. 2005). La definición del tamaño y forma de la parcela usualmente se realiza a partir de un muestreo piloto, en el que se establecen diferentes tamaños y formas de parcelas en un mismo punto y se calcula la varianza y tiempo de medición; la forma y tamaño de parcela con menor varianza estimada por unidad de tiempo es definida como la parcela óptima de medición (UNFCCC 2015).

En el caso de inventarios forestales nacionales para la estimación de carbono son varios los componentes de interés a medir (biomasa en árboles, biomasa en suelo, biomasa en hojarasca, biomasa en madera caída y biomasa en madera muerta). Cada uno de estos componentes tienen una correlación espacial y varianzas por unidad de área distintas. En estos casos es recomendable el uso de parcelas anidadas (MacDicken 1997). Por ejemplo, si la parcela para medir fustales es de 100 m x 100 m (1 ha), se pueden medir latizales en parcelas de 20 m x 20 m, y brinzales en parcelas de 5 m x 5 m.

Parcelas permanentes y temporales

Los proyectos REDD+ requieren de evaluaciones periódicas de los cambios en la cobertura y el stock de carbono. Para ello se realizan mediciones en el tiempo utilizando parcelas permanentes o temporales. Las parcelas permanentes son parcelas establecidas y marcadas de manera tal que puedan ser identificadas y medidas en varias ocasiones en el tiempo. Ese tipo de parcelas permiten estimar los cambios en las reservas de carbono con mayor exactitud que las parcelas temporales, ya que existe una covarianza entre las mediciones (MacDicken 1997, Pearson et al. 2005). La desventaja de las parcelas permanentes es que durante el tiempo puede presentarse pérdida de unidades debido al cambio de uso de la tierra o perturbaciones antrópicas o naturales, además de tener un mayor costo de establecimiento ya que se requiere de una demarcación más completa que en las parcelas temporales (Clark et al. 2001). Otra desventaja es que las parcelas permanentes, al tener ubicación conocida, pueden incentivar un manejo diferente, sesgando las estimaciones de los cambios.

Las parcelas permanentes, al tener identificados todos los individuos presentes en una medición, permiten obtener información de cambios de clases diamétricas, regeneración y mortalidad, lo cual puede ayudar a inferir sobre las posibles dinámicas y cambios en otros stocks de carbono como la madera muerta o estimación de las emisiones por aprovechamiento. Las mediciones en parcelas temporales, al no tener una covarianza, dificultan la obtención de un nivel de precisión deseado, por lo que es necesario tomar información de más unidades muestrales que en el caso del uso de parcelas permanentes. Algunas de las ventajas del uso de parcelas temporales es que tienen un menor costo de establecimiento y su ubicación no es conocida, por lo que no se tienen problemas de sesgo en la estimación por cambios en el manejo (Pearson et al. 2005).

Si las parcelas permanentes van a ser usadas para monitorear actividades de REDD+ es recomendable identificar áreas que no estén actualmente bajo estas actividades, ya que de lo contrario será difícil poder evaluar los efectos de las acciones del proyecto. También puede ocurrir que las parcelas permanentes en un área dada no sean suficientes para monitorear efectos de la implementación de acciones REDD+ a futuro.

Selección de la muestra

Es recomendable identificar el componente o variable con mayor varianza para definir el número de unidades muestrales necesarias; esto nos asegurará capturar la mayor parte de la varianza total para todas las variables o componentes (IPCC 2006). En muchas ocasiones el componente con mayor varianza no es el componente con mayor peso en la estimación total de la biomasa o carbono, o sus cambios en el tiempo no son significativos. En estos casos es mejor seleccionar el componente más importante, en términos de proporción a la estimación total, y que mayores cambios pueda presentar en el tiempo para definir el tamaño muestral necesario (IPCC 2003, 2006).

Es recomendable definir un esquema de muestreo específico para suelos, siempre que este sea uno de los componentes de interés para el estudio, porque es un componente de magnitud significativa en la estimación total del carbono, y puede tener alta varianza, pero generalmente no presenta cambios significativos a corto plazo, como el componente arbóreo (FCPF 2013).

El tamaño de la muestra para las mediciones en el tiempo debe calcularse teniendo en cuenta la varianza de cada estrato en particular, y cuando se tienen un número de unidades muestrales limitado también debe tenerse en cuenta el área proporcional del estrato. Una vez calculado el tamaño muestral se recomienda aumentar en un 10% en número de muestras por estrato para evitar la disminución de unidades muestrales necesarias por dificultades en el terreno u otros factores que pudiesen limitar la medición de parcelas.

El tiempo entre las mediciones o monitoreos debe calcularse con base en los cambios y las dinámicas de los bosques y los costos de medición. En el caso del componente arbóreo, un lapso de 5 años entre mediciones puede ser adecuado, pero en el caso de componentes con cambios más lentos, como el suelo, es común definir un lapso de 20 años para las mediciones (Pearson et al. 2005). La definición de cuáles componentes medir se describe más adelante.

3.2 Estimación de biomasa y carbono

Los cinco componentes de carbono principales son: biomasa arriba del suelo, biomasa subterránea, hojarasca, madera muerta (en pie y caída) y suelo; pero no es necesario realizar mediciones para estimar cambios en todos estos. El monitoreo de carbono requiere de la medición de una línea base para establecer un punto de partida y mediciones en el tiempo para la estimación del cambio. Estas mediciones deben realizarse siguiendo el mismo protocolo de muestreo y metodología para el cálculo; esto nos asegurará que las mediciones son comparables. Como el costo y tiempo de medición de todos los componentes puede ser alto y sus cambios en un tiempo determinado pueden no ser necesariamente significativos, se recomienda realizar mediciones en los componentes que pueden tener más variación en el tiempo.

Para proyectos REDD+, se recomienda realizar mediciones en los componentes en lo que se pueda presentar un cambio superior al 3% entre mediciones (MacDicken 1997, FCPF 2013, UNFCCC 2015). Según FCPF (2013) se considera conservador excluir ciertos reservorios, como el suelo, en actividades vinculadas a la deforestación y degradación evitada. Sin embargo, en algunos casos como en actividades de reforestación que realizan grandes alteraciones del terreno durante el desbroce y la plantación misma, o el manejo forestal en turberas, las emisiones de carbono del suelo pueden ser significativas y deben ser contabilizadas para mantener la integridad ambiental.

El carbono de la biomasa arriba del suelo y del suelo son los componentes que mayor participación tienen en la estimación del C total. El C en el suelo es uno de los componentes que tiene menores cambios en un lapso corto de tiempo (Coomes et al. 2002) pero presenta una magnitud significativa relativa al total del ecosistema. Por otro lado, la biomasa arriba del suelo o biomasa arbórea, además de ser una de las más representativas en la estimación de la biomasa total y por ende del C, es una de las que puede presentar mayores cambios en el tiempo, y también es utilizada para estimar la biomasa subterránea o biomasa en raíces a partir de una proporción de esta. Es por ello que la biomasa arriba del suelo es uno de los componentes principales en el cual se basan para definir el diseño de muestreo y es uno de los componentes en los que se recomienda tener la mayor precisión posible (GOF-C-GOLD 2009; IPCC 2000, MacDicken 1997).

Los principales métodos utilizados en la estimación de biomasa y carbono son: utilizando valores predeterminados o de referencia, estimación por medición y por modelación (IPCC 2000, 2006; GOF-C-GOLD 2009). La estimación con valores de referencia es aceptada únicamente cuando no es posible realizar algún tipo de medición, o que no sea eficiente hacerlo debido a los altos costos. Al seleccionar los componentes y métodos utilizados para realizar el monitoreo es importante hacer un análisis de costo-efectividad, para determinar si es eficiente la inversión de tiempo y dinero para la estimación o es suficiente con el uso de valores de referencia. En general, se debe hacer lo posible para usar estimaciones derivadas nacional o localmente.

Las estimaciones por medición son recomendadas para los componentes más importantes y que puedan presentar cambios significativos en el tiempo; para este tipo de mediciones es necesario la definición de un diseño de muestreo representativo. Los componentes de carbono que generalmente se estiman a partir de mediciones son: biomasa arriba del suelo, madera caída y hojarasca (MacDicken 1997). Por último, la estimación utilizando modelos es recomendada cuando se tiene información de cambio directo a partir de la relación de la información de la línea base y los monitoreos. Ésta última es la más precisa, pero también la que requiere mayor inversión y capacidades humanas.

Estimación de biomasa y carbono en árboles

Existen dos principales métodos para estimar la biomasa arriba del suelo: muestreo destructivo (método directo) y uso de modelos alométricos (método indirecto). El uso de modelos alométricos, es el método más ampliamente usado debido a su facilidad, bajo costo y que este es aceptado por el IPCC para la estimación y cálculo de los niveles de referencia. Cuando se utilizan modelos alométricos para la estimación de biomasa, es necesario verificar los rangos de diámetro, altura o cualquier otra variable independiente con las que fueron creados (Segura et al. 2008). El uso de valores mayores al rango del modelo alométrico solo es correcto si es considerada la forma funcional de la ecuación (por ejemplo, si el modelo considera llegar a una asíntota en la biomasa estimada). En casos de tener árboles cuyas variables alométricas estén muy fuera de rango (porque lo exceden) una alternativa es usar métodos volumétricos y factores de expansión.

Los modelos alométricos encontrados en la literatura pueden ser generales (por tipo de bosque o zona de vida) o específicos (por familia, género o especie). Los modelos generales producen estimaciones con mayor incertidumbre, ya que usa la información de muchas especies y un ámbito geográfico más amplio (Segura y Kanninen 2005). El IPCC recomienda la creación de modelos alométricos, ya sean generales o específicos, para lograr una estimación de carbono con menor incertidumbre. Por el alto costo para el desarrollo de estos, no es eficiente crearlos para todas las especies; generalmente se identifican las más abundantes o de interés particular para la creación de estos modelos, y se usan modelos genéricos para las demás.

Para evitar los sesgos en la estimación de biomasa a partir de modelos alométricos obtenidos de la literatura, lo ideal es validar los cálculos contra datos reales de cosechas de árboles. Sin

embargo, por la complejidad y el costo de esos procesos, se recomienda estimar el volumen de una muestra de árboles y multiplicar el volumen por la densidad de madera para obtener biomasa. Al comparar estas dos estimaciones se puede evaluar si existe un sesgo en el uso del modelo alométricos y si este está subestimando o sobrestimando la estimación de biomasa. La recomendación del IPCC (IPCC 2003) es seleccionar el modelo o método más conservador, es decir el modelo que estime la menor biomasa para un mismo individuo o parcela.

Cuando no se cuenta con modelos alométricos para la estimación de biomasa se pueden usar modelos para la estimación de volumen comercial y realizar el ajuste para calcular biomasa. En este caso, el ajuste puede realizarse de dos formas: usando factores de expansión de biomasa generales o estimando un factor de expansión de biomasa específico. El factor de expansión de biomasa general más ampliamente usado cuando se usan estimaciones volumétricas es 1.2 (Casanoves et al. 2017).

Los modelos alométricos para estimación de biomasa más ampliamente usados y considerados la mejor opción cuando no se tienen modelos específicos o locales son los de Chave et al. (2005) (Clark 2007). Chave et al. (2005) propone modelos para cuatro tipos de bosque (húmedo, muy húmedo, seco y manglar), clasificados por el número de meses en los que la evapotranspiración supera la precipitación y la precipitación media anual. Para cada tipo de bosque, Chave et al. (2005) proponen dos modelos, uno utilizando el dap y la densidad de madera, y otro adicionando la variable altura. Aunque los modelos que incluyen altura, además de dap, u otras variables son modelos mejores ajustados que los que utilizan únicamente dap y densidad de madera (Brown 1997, Nogueira et al. 2008) en muchas ocasiones es preferible utilizar los modelos sencillos (solo con dap y densidad de madera) ya que ésta es la variable que se puede medir con mejor precisión en campo y así generar estimaciones con menos incertidumbre. Además, la medición de variables adicionales incrementa el costo de levantamiento de la información (Alvarez et al. 2012). Una vez estimada la biomasa, ésta es llevada a carbono multiplicando por el factor 0.47 (IPCC 2014), que corresponde a la proporción generalizada de carbono en la materia vegetal.

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas para la obtención de biomasa usando variables dasométricas para especies y tipos de bosques comunes en los bosques de Costa Rica.

Tipo de bosque o especie	Ecuación	Fuente
Bosque tropical húmedo	$Ba = 0.01689*(d)^{1.6651}*(h)^{1.4412}$	Ortiz (1997)
	$Bt=0.01363*(d)^{1.8520}*(h)^{1.2611}$	Ortiz (1997)
<i>Calophyllum brasiliense</i>	$\ln(Ba)=-2.829+2.704*\ln(dap)$	Montero et al. (2005)
<i>Vochysia guatemalensis</i>	$\ln(Ba)=-2.815+2.428*\ln(dap)$	Montero et al. (2005)
<i>Vochysia ferruginea</i>	$\ln(Ba)=-3.252+2.492*\ln(dap)$	Montero et al. (2005)
<i>Jacaranda copaia</i>	$\ln(Ba)=-4.398+2.765*\ln(dap)$	Montero et al. (2005)
<i>Virola koschnyii</i>	$\ln(Ba)=-4.132+2.755*\ln(dap)$	Montero et al. (2005)
<i>Dipteryx panamensis</i>	$\ln(Ba)=-3.011+2.947*\ln(dap)$	Montero et al. (2005)

<i>Terminalia amazonia</i>	$\ln(Ba)=-2.538+2.614*\ln(dap)$	Montero et al. (2005)
<i>Genipa americana</i>	$\ln(Ba)=-4.084+2.958*\ln(dap)$	Montero et al. (2005)
<i>Hyeronima alchorneoides</i>	$\ln(Ba)=-1.696+2.224*\ln(dap)$	Montero et al. (2005)
<i>Balizia elegans</i>	$\ln(Ba)=-4820+2.959*\ln(dap)$	Montero et al. (2005)
Bosque Secundario (3-20 años)	$Ba=-1.80246+2.28927*\ln(dap)$	Fonseca et al. (2009)
<i>Vochysia guatemalensis</i>	$Ba=\exp(-1.44742+1.3308*dap^{0.5})$	Fonseca et al. (2009)

Cuadro 2 (Continuación). Ecuaciones alométricas para la obtención de biomasa usando variables dasométricas para especies y tipos de bosques comunes en los bosques de Costa Rica.

<i>Hyeronima alchorneoides</i>	$Ba=\exp(-2.12607+1.69594*dap^{0.5})$	
<i>Terminalia amazonia</i> en plantación	$Ba= \text{EXP}[-1.648+2.392*\ln(dap)]$	Montero et al. (2002)
Bosque Secundario	$Ba=-1.80246+2.28927*\ln(dap)$	Fonseca et al. (2009)
<i>Euterpe precatoria</i> y <i>Phenakospermum guianensis</i>	$Ba= [e^{(0.76+0.00015*dap^2)}]*1000$	IPCC (2003)
Todos los tipos de bosque	$\ln(Ba)=2.277+2.017\ln(dap)+0.715\ln(h)+0.718\ln(dm)$	Alvarez et al. (2012)
Todos los tipos de bosque	$\ln(Ba) = 3.103 + 1.794 \ln(dap)+1.290 (\ln(dap))^2 -0.128 (\ln(dap))^3 + 0.819\ln(dm)$	Alvarez et al. (2012)
<i>Acacia mangium</i> (Sistema silvopastoril)	$Ba= 3.4 + 0.064*dap^2 + 1.0*ht$	Andrade (1999)
<i>Eucalyptus deglupta</i> (Sistema silvopastoril)	$Ba = 4.2 + 0.052*dap^2 + 1.1*ht$	Andrade (1999)
<i>Pithecellobium saman</i> , <i>Dalbergia retusa</i> , <i>Diphysa robinoides</i> (Sistema silvopastoril)	$Ba = 10^{-1.54 + 2.05 \log(DCM) + 1.18 \log(ht)}$	Andrade (2007)
Varias especies	$B = e^{-7.3 + 2.1*\ln(dap)} * 1000$	Segura y Kanninen (2005)
Bosque seco	$Ba= 34.4703-8.0671 (dap) + 0.6589 (dap^2)$	Brown et al. (1989)
Bosque húmedo	$Ba= 34.4908-11.7883 (dap) + 1.1926 (dap^2)$	Brown et al. (1989)
Bosque muy húmedo	$Ba= \exp(-3.3012+0.9439 \ln(dap^2*h))$	Brown et al. (1989)

Notas: Ba: biomasa aérea; Bt: biomasa total; d: diámetro; dap: diámetro a la altura del pecho; h: altura; ht: altura total; DCM: diámetro cuadrático medio.

Otros componentes de carbono

Otros componentes de carbono que se evalúan en los inventarios forestales nacionales son: plantas herbáceas, madera caída, hojarasca y suelo. Para evaluarlos se establecen parcelas o unidades de muestreo anidadas en la parcela principal. La estimación del carbono en plantas herbáceas generalmente se realiza tomando muestras definidas por un marco de muestreo de 0.25 m² (0.50 x 0.50 cm), en donde se corta o cosecha todo el material vegetal y luego es pesado en verde. Posteriormente se extrae una submuestra de 1000 g, compuesta por material vegetal de las dos muestras, y ésta es llevada al laboratorio para ser secada y pesada. La metodología para la medición de carbono de hojarasca es similar a la mencionada anteriormente. Se considera hojarasca al material compuesto por ramas, tallos, hojas, cortezas y otros compuestos leñosos y no leñosos cuyo diámetro este entre 2 mm y 10 cm (FAO 2015).

Incertidumbre

La incertidumbre es definida como la falta de conocimiento del valor verdadero (FCPF 2013); esta calcula a partir de las estimaciones de la variable de interés. El método más usado para calcular la incertidumbre es usando intervalos de confianza, lo cuales pueden ser calculados a partir de los cantiles de una distribución normal, o por estimaciones Bootstrap o métodos de simulación Montecarlo.

El análisis de incertidumbre debe ser usado como herramienta para identificar los estratos o tipos de bosque que requieren un mayor esfuerzo de muestreo y para definir la metodología adecuada para la medición y estimación de la biomasa y el carbono. El IPCC (2003) no establece un porcentaje de incertidumbre que considere adecuado, pero enfatiza la importancia de disminuirla al máximo entre mediciones. Según Brown (2002) y el GOF-GOLD (2015), un equilibrio entre costo y eficiencia estadística en la estimación puede lograrse con incertidumbres cercanas al 10%. Este cálculo de las incertidumbres y tamaños de muestra se realiza generalmente usando una confianza del 95%, i.e. en el 95% de las estimaciones los valores de los límites inferior y superior del intervalo de confianza contendrán al verdadero valor del parámetro (IPCC 2006).

3.3 Evaluación de la degradación

Para evaluar la degradación es necesario definir lo que se considera como degradación y definir los tipos de coberturas forestales que tiene el país y sus características (IPCC 1996, FCPF 2013, OIMT 2002). Para efectos del mecanismo de REDD+, la definición está circunscrita solo al carbono y en Costa Rica se define como: "...una reducción estadísticamente significativa en la magnitud de las existencias de carbono en áreas definidas como bosque maduro, debida a acciones antropogénicas (incendios, tala ilegal, malas prácticas agrícolas y otros), y que pueda ser cuantificada y monitoreada por medio de sensores remotos y datos de campo" (CATIE 2015).

La degradación puede evaluarse usando métodos directos e indirectos que relacionen indicadores de procesos de degradación o restauración a través del análisis de la dinámica de

cambios de la cobertura y uso de la tierra. Este tipo de análisis es simple ya que solo se necesita la información de cobertura por cada estrato y su cambio en el tiempo. Entre los métodos indirectos se puede usar información obtenida de encuestas, estudios científicos relacionados al bosque e información de aprovechamiento de madera (Asner s.f., FCPF 2013). Para la evaluación de la degradación y establecimiento de programas de reducción de emisiones, es necesario identificar las fuentes antropogénicas y los componentes de carbono asociados con actividades REDD+, y se deben estimar las emisiones por deforestación y degradación forestal. Las emisiones causadas por degradación forestal deben tomarse en cuenta cuando estas representen más del 10% del total de las emisiones asociadas a bosque (GOFC-GOLD 2009).

Los bosques degradados se clasifican en tres: bosques primarios degradados, bosques secundarios degradados o tierras forestales degradadas. Los bosques degradados son los bosques que tienen menos del 10% de su cobertura original (GOFC-GOLD 2009; UNFCCC 2006). Cuando se tiene un bien o servicio de interés es necesario reestructurar la escala con base al servicio objetivo y es en estos casos en los que se requiere definir las variables a evaluar. Si se piensa en degradación de bosques por efecto de la intervención antrópica, algunas de las variables que se podrían evaluar en un INF son:

- Presencia y número de tocones
- Madera caída
- Árboles muertos
- Porcentaje de cobertura del bosque original
- Presencia de especies exóticas o que no pertenecen al ecosistema presente
- Presencia de quema, porcentaje del área afectada por quema
- Presencia de pastos
- Número de individuos en las diferentes categorías de crecimiento (brinzales, fustales y latizales, no existe presencia de regeneración, ausencia de clases jóvenes)
- Daños mecánicos en árboles
- Cambios en la composición de especies
- Tasas de crecimiento
- Porcentaje de especies heliófitas y conservativas

4. Procedimientos estadísticos

Como parte de la construcción y presentación definitiva de sus NRF/NREF, Costa Rica debe explorar los datos disponibles a partir del INF para definir el número mínimo aceptable de estratos de bosque en el INF de Costa Rica para minimizar el error en la estimación de emisiones. Además, debe para determinar si es posible detectar procesos de degradación forestal a partir de esos mismos datos, mediante relaciones entre la biomasa y otras variables estructurales de los bosques con el porcentaje de cobertura de copas. Esta sección aborda esos procedimientos estadísticos realizados con la base de datos del INF de Costa Rica², de forma que el país cuente con una respuesta estadísticamente robusta para continuar

² Ver la descripción completa de la base de datos en el Anexo 1.

alimentando su proceso de REDD+ y también para que, posteriormente, el personal técnico de FONAFIFO pueda actualizar los cálculos continuamente.

4.2 Calidad de las bases de datos

Una vez establecido y llevado a cabo un INF es importante hacer control de calidad de la información recolectada en campo, a partir de la cual se realizarán estimaciones a nivel nacional y se establecerán los niveles de referencia para programas REDD+. La base de datos de un INF se compone de información cuantitativa o cualitativa. A continuación, se describen los principales métodos usados para la identificación, verificación y corrección de datos. Estos métodos pueden ser utilizados para procesar la información proveniente de cualquier estudio, pero para este caso se presentan ejemplos basados en la información de inventarios forestales.

Unificación de criterios

La unificación de criterios se refiere a la codificación de variables categóricas, definición de los nombres de las variables, y depuración de la información cualitativa. Las variables que contienen la información de la ubicación de la parcela (provincia, cantón o distrito) o la información del estrato o tipo de bosque al cual pertenece puede estar codificada. Este tipo de información es conocida *a priori* y la cantidad de niveles posibles puede ser definida por el usuario. Por ejemplo, al momento de registrar la información de una parcela en el Parque Nacional Volcán Irazú, el sitio de la parcela puede ser identificado de diversas formas (P.N. Volcán Irazú, PNVI, P.N.V.I., PN Irazú), cada una dando origen a una nueva categoría. Una variable de este tipo puede estar codificada con un número o una serie de letras que identifiquen el Parque Nacional; escribir un código único y corto facilita el manejo de información y evita errores.

Un INF genera información a distintos niveles (estrato, parcela, subparcela), que al final se resumen en una estimación a nivel nacional. Para poder lograr la estimación final es necesario llevar la información contenida en la sub-parcela a nivel de parcela, está a nivel de conglomerado y por último a nivel de estrato. Para poder hacerlo es necesario unir información proveniente de distintas bases de datos (hojarasca, madera caída, suelo, fustales, brinzales, etc.); para ello es necesario contar con un identificador único que sirva de criterio de concatenación para unir tablas.

Otro de los factores claves para la obtención de estimaciones acertadas es la correcta definición de los modelos alométricos que se van a utilizar, que depende de la correcta codificación de los nombres científicos, géneros, familias o tipo de bosque. Es importante identificar sinonimias o corregir los errores de tipeo para definir la ecuación alométrica adecuada a cada individuo (Casanoves et al. 2017).

Estandarización de las unidades de medición

Es importante tener claro las unidades de medida en las que fueron tomadas cada una de las variables, ya que si no son estándar no se pueden identificar valores atípicos. Así, se deben

estandarizar las variables llevándolas a una única unidad, por ejemplo, centímetros para DAP y metros para la altura. Es recomendable que las unidades utilizadas sean las unidades con las que comúnmente se reportan este tipo de valores o las que se utilizan para realizar estimaciones a partir de modelos alométricos.

Una vez estandarizadas las variables se procede al control de calidad de la base de datos. El proceso denominado “curación” de la base de datos requiere el uso de diversos estadísticos que permitan identificar los errores de ingreso de registros o los valores atípicos, para ser corregidos o eliminados. Los estadísticos más usados para hacer este control son la media, máximo, mínimo, mediana, cuantiles y coeficiente de variación (CV).

4.2.1 Depuración de las bases de datos

La finalidad de la labor de depuración y control de calidad de la información es garantizar que las estimaciones tengan el menor error posible y no tengan ningún tipo de sesgo que pudiera haber sido detectado y eliminado a priori del análisis del contenido de carbono (IPCC 2003, 2006). Para depurar las bases de datos del INF de Costa Rica se creó una variable con el nombre “bloqueo” que indica a través de códigos numéricos la razón por la que se decidió bloquear el caso o registro (Cuadro 1). Los registros bloqueados no se tomaron en cuenta en los análisis y cálculos realizados.

Cuadro 1: Códigos asignado para cada una de las razones para omitir casos usando la variable “bloqueo” en la base de datos del inventario nacional forestal de Costa Rica.

Código	Comentario
1	No tiene información de dap (107 casos)
2	Árboles con dap menor a 2 cm (3 casos)
3	Árboles con dap mayor a 10 cm en parcelas de 2 a 9.99 cm de dap (14 casos)
4	Árboles con dap menor a 10 cm en parcelas de 10 cm en adelante (9 casos)
5	Relación dap-altura (732 casos)
6	Estandarización de dap por especies; se buscaron todos los casos mayores a 4 desvíos estándar (35 casos)

Los principales procesos desarrollados para depurar la base de datos fueron los siguientes:

- 1) Identificación de valores faltantes. La primera actividad realizada fue la identificación de los registros incompletos, principalmente a los que les hiciera falta la información de DAP. Para el caso de la estimación de número de individuos por hectárea o el cálculo de los índices clásicos de diversidad la información del DAP no es necesaria, pero para la estimación de la biomasa a partir de modelos alométricas es la variable más importante. Se identificaron todos los registros que no tenían información de DAP (107 casos) y se bloquearon.
- 2) Detección de valores fuera de rango. Esto se hace usando para cada variable los valores máximos y mínimos. Por ejemplo, si en el caso de árboles en parcelas donde se midió individuos mayores a 10 cm de DAP, se encuentran valores menores a 10 cm. Otro caso

- es cuando se encuentran valores cero para un DAP o para una altura. En total se identificaron 26 casos con valores fuera de rango.
- 3) Detección de valores por medio de revisiones lógicas. El caso que mejor ejemplifica este procedimiento es el de depuración de alturas totales y alturas comerciales de árboles. En este caso se realizó la resta de altura total menos altura comercial, y donde ésta dio valores negativos dedujimos errores de transcripción o de medición. Se identificaron 51 de estos casos.
 - 4) Detección de valores atípicos para una relación. Se realizaron técnicas gráficas como los diagramas de dispersión entre DAP y altura total para determinar qué árboles tenían problemas en la relación, y por ende en el dato de alguna de estas variables. Por ejemplo, un árbol de *Ceiba pentandra* puede tener 30 m de altura, pero no puede tener esta altura y 15 cm de dap. En total se identificaron 732 casos.

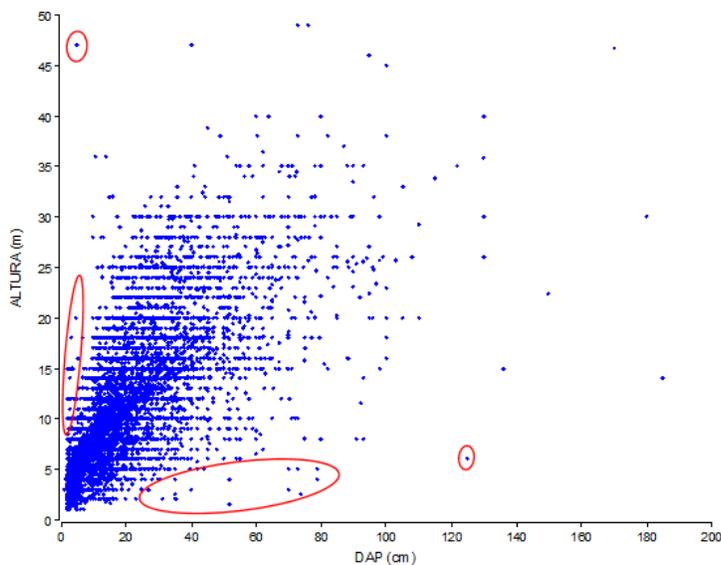


Figura 1. Diagrama de dispersión entre altura y DAP para detectar datos atípicos en esta relación. Las elipses rojas ejemplifican datos atípicos.

- 5) Identificación única de una especie. Los nombres científicos fueron revisados para encontrar sinonimias y problemas de escritura de género y especie. Esto es indispensable para poder hacer análisis de biodiversidad, de especies con valor comercial, especies amenazadas, etc. Para este fin se utilizó el software FDiversity (Casanoves et al. 2010, 2011) para la corrección e identificación de sinonimias de nombres científicos.

4.2.2 Estimación de biomasa y carbono

Los métodos más comúnmente usados para realizar estimaciones de carbono son: estimación por valores predeterminados o por defecto, estimación a partir del uso de modelos alométricos y estimación por medición directa del componente. El uso de valores predeterminados es aceptado únicamente cuando no es posible realizar algún tipo de medición por problemas de costo-efectividad o cuando la precisión que se puede obtener

utilizando métodos de medición no justifique la inversión en tiempo y en dinero. Es común que en los inventarios de monitoreo de carbono no se realicen mediciones en todos los componentes.

El componente de la biomasa arriba del suelo está constituido por la biomasa en árboles (árboles vivos, árboles muertos en pie y tocones), arbustos, regeneración y lianas, y es el componente que más cambios puede presentar entre mediciones. La biomasa en árboles representa la mayor proporción de biomasa arriba del suelo, por esto nos enfocamos en la presentación de metodologías utilizadas para su medición.

Biomasa en árboles

Existen dos métodos principales con los que se puede estimar biomasa: utilizando modelos de estimación o realizando muestreo destructivo. El muestreo destructivo se refiere a la cosecha o corta del árbol; una vez cortado se separa en ramas, hojas y tallo y se secan las partes. Este es el método más preciso de estimación, pero también requiere más inversión de tiempo y dinero, además de que implica la destrucción del árbol. Por lo tanto, no es el método adecuado cuando se desea realizar estimaciones para grandes áreas o bosques.

Por lo anterior, los modelos de estimación son los más ampliamente usados, ya que disminuyen costos y tiempo, son fáciles de usar y son aceptados por el IPCC. La metodología que se utilice para la estimación de biomasa depende de la información con la que se cuente. En los inventarios forestales generalmente se mide el DAP, la altura, se identifica la especie y el estado del árbol (vivo, muerto, dañado, tocón).

Ecuaciones alométricas

Las ecuaciones alométricas pueden ser generales, por tipo de bosque, o específicas por familia, género y especie. Todas las ecuaciones alométricas tienen una incertidumbre asociada y mientras más general es la ecuación la incertidumbre es más alta. Es recomendable usar o crear ecuaciones lo más específicas posible, pero es importante tener en cuenta que la información que se va a utilizar para estimar se encuentre entre los rangos de diámetros y/o altura con los que fue desarrollada la ecuación. Entre las ecuaciones generales, las más utilizadas y recomendadas por el IPCC (2006) son las ecuaciones de Brown (1989) y Chave et al. (2005).

Es recomendable seleccionar una muestra de árboles y estimar la biomasa a partir del volumen y la densidad de madera y, además, comparar los resultados obtenidos mediante los dos métodos, es decir la ecuación alométrica y volumen, para asegurar que no exista sesgo sistemático en las estimaciones (Casanoves et al. 2017). Esto no se hizo en este trabajo ya que el volumen calculado provenía de un único dato de diámetro y no se tenía la información del factor de forma y factor de expansión de biomasa adecuado por especie o género.

4.3 Determinación de la calidad de las estratificaciones

El INF de Costa Rica cuenta con dos clasificaciones de estrato: una realizada para los resultados del INF y otra utilizando la serie histórica para estimar los NREF. Para evaluar las diferencias estadísticas entre los estratos de las dos clasificaciones se utilizó la prueba de comparación de medias multivariada DGC usando todas las variables de respuesta disponibles en la base de datos del inventario forestal nacional de Costa Rica, y análisis de varianza univariado para determinar la consistencia de estos estratos con respecto a la variable biomasa.

Para la estratificación realizada por el INF se obtuvo que todos los estratos son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) con las variables biomasa, DAP, DMC, altura, AB, densidad y volumen. El estrato pasto con árboles es el más disímil. Mientras que el bosque secundario y plantación forestal son los más parecidos (Figura 2).

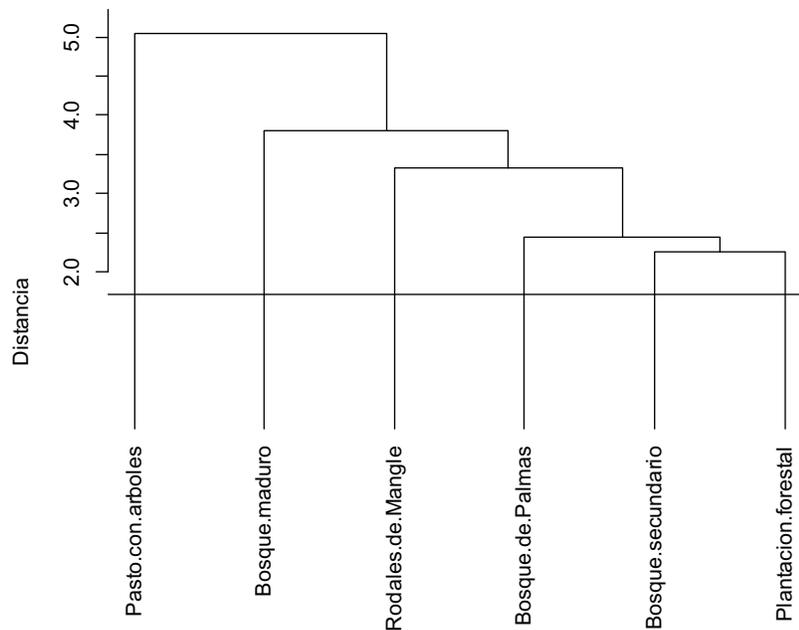


Figura 2. Dendrograma obtenido a través de la prueba de comparación de medias multivariadas DGC. Los estratos comparados son los obtenidos del inventario forestal nacional de Costa Rica, usando las variables biomasa, DAP, DMC, altura, AB, densidad y volumen.

Para la estratificación realizada usando la serie histórica (NREF) solo el manglar resultó estadísticamente diferente ($p < 0.05$) con las variables biomasa, DAP, DMC, altura, AB, densidad y volumen. Los estratos bosque secundario y bosque maduro son los más similares, pero no difieren estadísticamente del resto de las categorías excepto manglar (Figura 3)

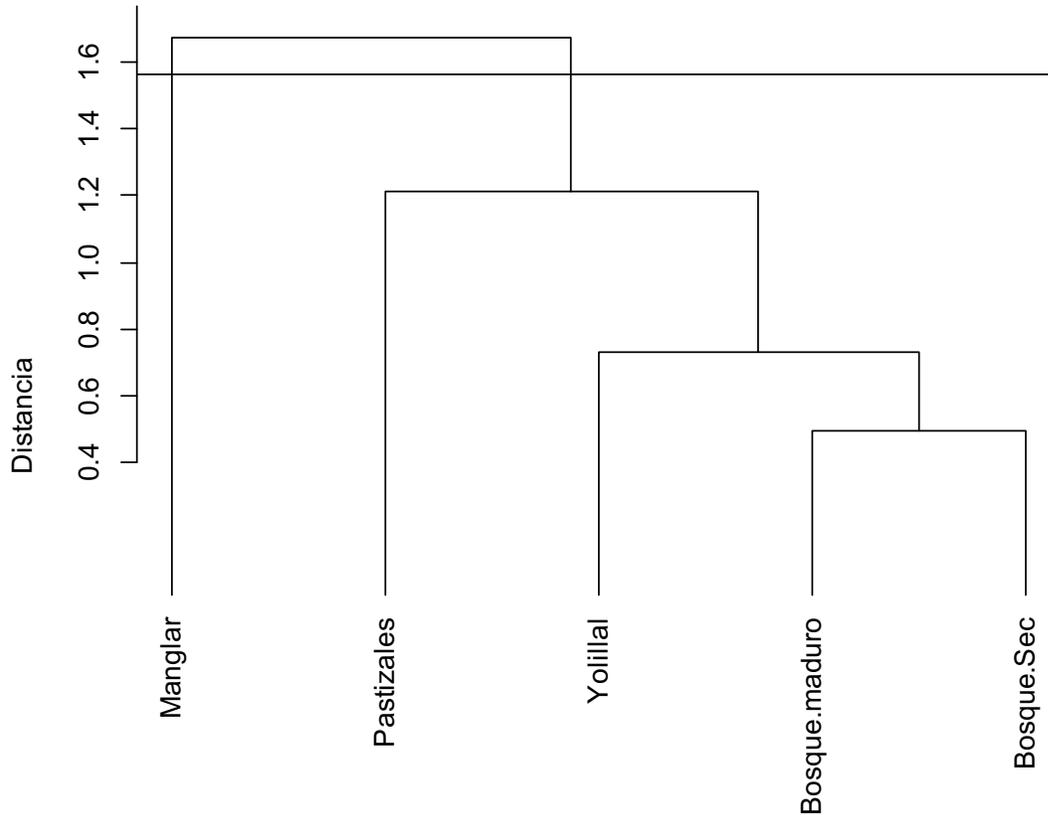


Figura 3. Dendrograma obtenido a través de la prueba de comparación de medias multivariadas DGC. Los estratos comparados son los obtenidos a través de la serie historia de los NREF usando las variables biomasa, DAP, DMC, altura, AB, densidad y volumen

Los inventarios forestales pueden utilizados para diversos objetivos, biomasa, producción de madera y biodiversidad, estado del bosque, entre otros. La estratificación que se emplee depende de las variables de interés según el objetivo del estudio. Si se planea un inventario de uso múltiple, la estratificación realizada por el IFN es más adecuada ya que en esta estratificación todos los estratos son diferentes cuando se usan las variables biomasa, DAP, DMC, altura, AB, densidad y volumen (Figura 2). En cambio, si el objetivos es solo biomasa (o carbono) esta clasificación solo puede detectar tres grupos significativamente diferentes: uno compuesto por el estrato bosque maduro, otro que reúne a plantación forestal y pasto con árboles, y el tercer reuniendo a manglar, palmas y bosque secundarios (prueba DGC, $p < 0.05$, Figura 4).

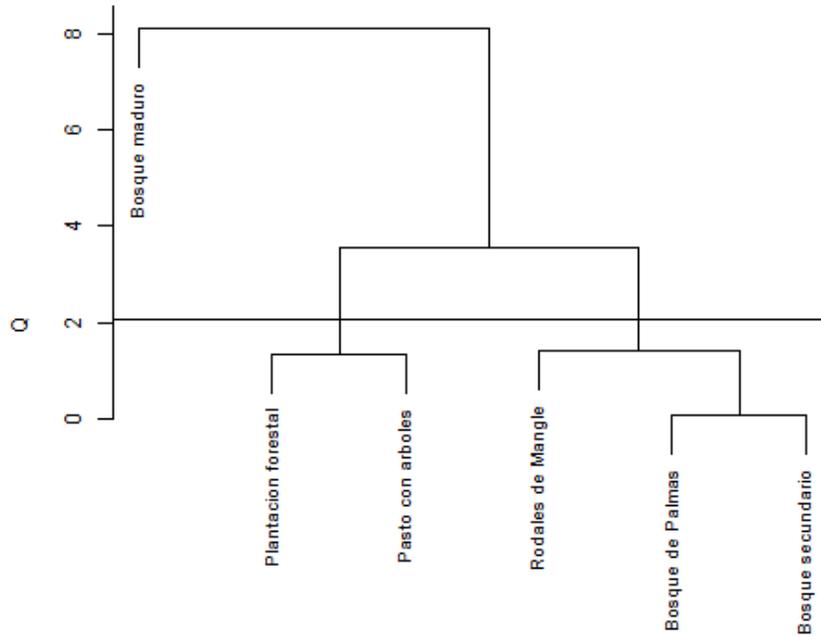


Figura 4. Dendrograma obtenido a través de la prueba de comparación de medias DGC ($p < 0.05$) de la variable biomasa usando los estratos del inventario forestal nacional de Costa Rica.

En cambio, si se usa la estratificación según los NREF, y considerando sólo biomasa (o carbono) esta clasificación solo puede detectar dos estratos diferentes significativamente (prueba DGC, $p < 0.05$, Figura 5).

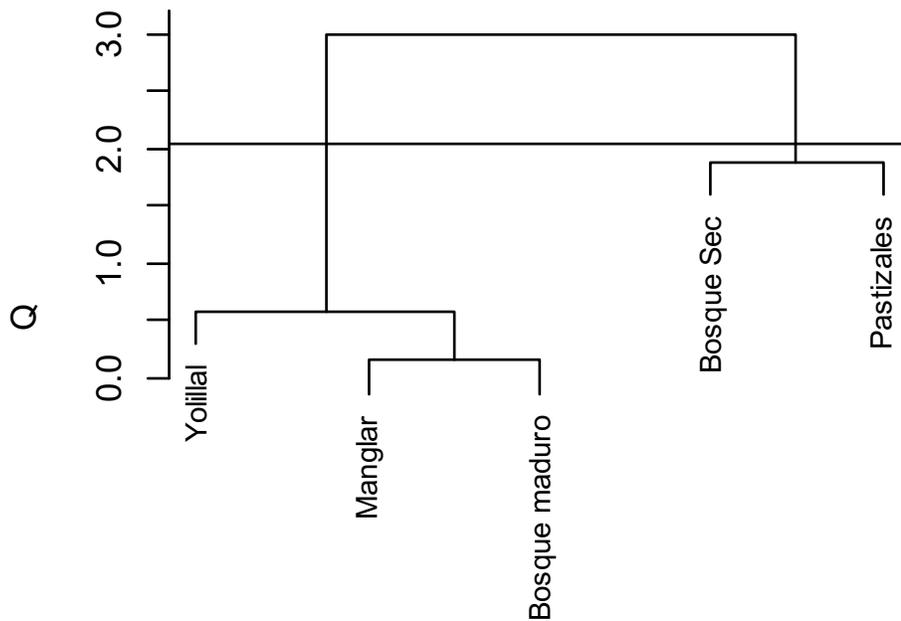


Figura 5. Dendrograma obtenido a través de la prueba de comparación de medias DGC ($p < 0.05$) de la variable biomasa usando los estratos de la serie historia de los NREF para Costa Rica

4.4 Estimaciones de biomasa usando métodos alternativos

El inventario forestal nacional de Costa Rica fue analizado por FONAFIFO usando modelos generales (Brown y Arriaga, 2002, Brown 1989, Perez y Kaninen 2003, Fonseca et al. 2009 y Chave 2005). En este trabajo se recalcularon las estimaciones de manera independiente usando las ecuaciones generales por tipo de bosque de Chave et al. (2005), y ecuaciones específicas para siete especies, dos para especies de mangle y cinco para especies de palmas (Cuadro 2). También se utilizaron ecuaciones por familias para las palmas y los árboles de mangle que no pertenecieran a las especies con ecuaciones específicas o su DAP no estuviera dentro del rango de diámetros de la ecuación. Por último, se utilizó una ecuación específica para los registros identificados como lianas. Los registros identificados como cactáceas, chusquea, helechos y hemiepipítas fueron descartados de la estimación ya que no se contaba con una ecuación adecuada para ellos y tampoco son relevantes para la biomasa aérea por su escasa abundancia (Cuadro 4). La estimación de la biomasa se realizó creando una variable que indicara la ecuación a utilizar para cada uno de los registros, según el hábito de crecimiento, dap y altura. La densidad de madera utilizada para estimar biomasa fue la que ya había sido asignada por el INF. Para verificar las estimaciones de biomasa se utilizaron controles cruzados para cada uno de los hábitos de crecimiento.

Cuadro 2. Ecuaciones usadas para la estimación de biomasa aérea para el inventario nacional forestal de Costa Rica.

Código ecuación	Ecuación	Descripción	Rango	Fuente
1	$Ba=21.30*Hc$	Palmas del género <i>Astrocaryum</i>	Altura comercial entre 1.5-9 metros	Goodman et al. (2013)
2	$\ln(Ba)=3.25+1.12*\ln(Hc+1)$	Palmas del género <i>Attalea</i>	Altura comercial <20.1 metros	
3	$Ba= -108.81+13.58*Hc$	Palmas del género <i>Euterpe</i>	Altura comercial entre 10.2-20.4 metros	
4	$\ln(Ba)= -3.48+0.94*\ln(dap^2*Hc)$	Palmas del género <i>Iriartea</i>	Altura comercial entre 3.3-21.8 DAP entre 6-33 cm	
5	$\ln(Ba)= -3.79+1.00*\ln(dap^2*Hc)$	Palmas del género <i>Socratea</i>	Altura comercial entre 2-21.9 metros y DAP entre 4-24 cm	

6	$\ln(Ba) = -3.34 + 2.74 * \ln(dap)$	Familia Arecaceae	DAP entre 6-40 cm
---	-------------------------------------	----------------------	----------------------

Cuadro 3 Continuación). Ecuaciones usadas para la estimación de biomasa aérea para el inventario nacional forestal de Costa Rica.

7	$Ba = (\rho * \exp(-1.499 + (2.148 * \ln(dap)) + (0.207 * (\ln(dap))^2) - 0.0281 * (\ln(dap))^3))$	Bosque húmedo	DAP > 5 cm	
8	$Ba = (\rho * \exp(-1.239 + (1.98 * \ln(dap)) + (0.207 * (\ln(dap))^2) - 0.0281 * (\ln(dap))^3))$	Bosque muy húmedo	DAP > 5 cm	
9	$Ba = (\rho * \exp(-0.667 + (1.784 * \ln(dap)) + (0.207 * (\ln(dap))^2) - 0.0281 * (\ln(dap))^3)) /$	Bosque seco	DAP > 5 cm	
11	$Ba = 200.4 dap^{2.1}$	<i>Avicennia germinans</i>	DAP entre 1-4 cm	Fromard et al. (1998)
12	$Ba = 0.14 dap^{2.4}$	<i>Avicennia germinans</i>	DAP > 4 cm	
13	$Ba = 102.3 dap^{2.5}$	<i>Laguncularia racemosa</i>	DAP < 10 cm	
14	$128.2 dap^{2.6}$	<i>Rhizophora</i> spp.	DAP < 35 cm	
15	$\ln(Ba) = -1.48 + 2.65 * \ln(dap)$	Lianas	DAP entre 0.5-22.6 cm	Schnitzer et al. (2006)

Notas: Ba: biomasa arriba del suelo; Hc: altura comercial; ρ : gravedad específica de la madera; dap: diámetro a la altura del pecho.

Cuadro 4: Abundancia por cada hábito de crecimiento en el inventario nacional forestal de Costa Rica.

Habito de crecimiento	Número de individuos
Árbol	8724
Cactáceas	3
Chusquea	115
Helecho	29
Hemiepífitas	1
Liana	164
Palmas	733

Usando los datos de biomasa por parcela del INF de Costa Rica, previamente depurados siguiendo los protocolos mencionados en la sección 4.1, se calculó la biomasa promedio por hectárea para las estratificaciones de los NREF y del IFN. Se estimaron las biomásas aéreas

utilizando las ecuaciones alométricas propuestas en este estudio para cada categoría (Cuadro 2). Luego se calcularon las incertidumbres en la estimación de biomasa por cada estrato para la variable biomasa original (biomasa calculada en el IFN de Costa Rica) para la estratificación del IFN (Cuadro 5) y la estratificación de los NREF (Cuadro 6) y las correspondientes a la biomasa calculada en este estudio (Cuadro 7).

Cuadro 5. Estimación de biomasa aérea por estrato y su incertidumbre para los estratos definidos por el inventario nacional forestal de Costa Rica.

Estrato	Estimación	E.E.	n	LI (95%)	LS (95%)	Incertidumbre
Bosque de palmas	105.79	13.74	19	76.92	134.67	27.30
Bosque maduro	238.54	19.18	53	200.05	277.03	16.14
Bosque secundario	104.46	8.51	78	87.52	121.41	16.22
Pasto con árboles	23.69	3.52	68	16.66	30.71	29.67
Plantación forestal	54.28	9.51	17	34.12	74.45	37.14
Rodales de mangle	144.95	24.90	12	90.14	199.76	37.81

Cuadro 6. Estimación de biomasa aérea por estrato y su incertidumbre para los estratos definidos por la serie historia de los NREF de Costa Rica

Tipo	Estimación	E.E.	n	LI (95%)	LS (95%)	Incertidumbre
Bosque maduro	141.83	12.31	116	117.44	166.22	17.20
Bosque secundario	83.58	11.99	49	59.47	107.70	28.85
Manglar	146.63	24.53	12	92.65	200.61	36.82
Pastizales	43.26	9.52	49	24.13	62.40	44.23
Yolillal	126.05	14.16	21	96.51	155.59	23.44

La estratificación realizada por NREF no es un caso particular de la del INF, ya que además de combinar bosques secundarios con plantaciones, también reubica a numerosas parcelas en estratos diferentes. Al comparar los niveles de incertidumbre se puede observar que usando la estratificación de NREF las incertidumbres en promedio aumentan. Usando la estratificación NREF aumenta la incertidumbre de bosque maduro, la de bosque secundarios y la de pastizales (esta última tiene el aumento más importante). En el caso de bosque secundario en los NREF se tiene una incertidumbre de 28.85, que es superior al promedio de las incertidumbres de bosque secundario y plantaciones forestales en el INF (16.22 y 37.14, respectivamente). Los únicos estratos que mejoran la incertidumbre usando los NREF son manglar y bosque de palmas, pero solo este último tiene una mejora respecto al INF.

En la comparación de los niveles de incertidumbre anterior, se debe considerar que los valores de incertidumbre son afectados no solo por el error estándar de las estimaciones, que a su vez depende del tamaño de la muestra y la desviación estándar, sino también por el valor de la estimación de biomasa. Al haber reagrupado estratos y reasignado varias parcelas de un estrato a otro, estas estadísticas que afectan a la incertidumbre cambian.

Como la incertidumbre también depende de la cantidad de biomasa estimada (en general a mayor biomasa más fácil es alcanzar la incertidumbre deseada), es de primordial importancia obtener buenas estimaciones de biomasa por parcela. Las biomásas estimadas en este trabajo presentaron en todos los casos menor incertidumbre que las estimaciones originales del NREF usando la estratificación de los niveles de referencia (Cuadro 7).

Cuadro 7: Estimación de biomasa aérea por estrato y su incertidumbre para los estratos utilizados son los obtenidos de la serie historia de los NREF con las estimaciones realizadas en este estudio.

Tipo	Estimación	E.E.	n	LI (95%)	LS (95%)	Incertidumbre
Bosque maduro	213.14	17.79	115	177.91	248.38	16.53
Bosque Secundario	123.26	14.86	48	93.38	153.15	24.25
Manglar	180.38	21.85	11	131.70	229.07	26.99
Pastizales	70.87	13.96	47	42.76	98.97	39.66
Yolillal	172.33	17.66	21	135.49	209.16	21.37

Para poder visualizar mejor estas diferencias en las estimaciones y sus respectivas incertidumbres, se evaluaron las diferencias en porcentaje entre las dos estimaciones (Cuadro 8). Los pastizales y los bosques maduros tuvieron un aumento muy importante de su biomasa estimada, superior al 50%. El estrato que menos difiere con la estimación original es el manglar; sin embargo, nuestras estimaciones dan más de 23% de biomasa en este estrato. La reducción de las incertidumbres también es importante, sobre todo en el caso del manglar, con un 26% menos en nuestra estimación. El bosque maduro, es el que menos reducción en incertidumbre presenta, cerca del 4%, pero este estrato, con 115 parcelas evaluadas y la mayor cantidad de biomasa en el inventario (213.14 Mg/ha) es el que más aporta al secuestro de C a nivel nacional en Costa Rica.

Cuadro 8. Diferencia porcentual en las estimaciones e incertidumbres por estrato utilizando los resultados de la biomasa estimada por el INF de CR y la biomasa estimada en este estudio con base en los estratos obtenidos de la serie historia de los NREF.

Estrato	Diferencia entre las estimaciones (Mg/ha)	Porcentaje (%) de diferencia en la incertidumbre
Bosque maduro	50.28	-3.87
Bosque secundario	47.48	-15.96
Manglar	23.02	-26.70
Pastizales	63.82	-10.33
Bosque de palmas	36.72	-8.81

En síntesis, utilizando una combinación de ecuaciones alométricas para hacer estimaciones más específicas por hábito de crecimiento y especie, se logró mejorar significativamente las incertidumbres. Lo que cambió más evidentemente entre las dos formas de cálculo es el valor

estimado de biomasa. Es sabido que las diferentes formas de estimación generan diferentes valores, algunas con sesgos positivos, otras con sesgos negativos. Este ejercicio se hizo con el fin de determinar en qué estratos se obtenían las mayores diferencias entre las aproximaciones, ya que al no saber cuál es el verdadero valor en la población no podemos decir que una aproximación sea mejor que la otra. Lo cierto y lo más importante es que, para fines comparativos entre periodos de evaluación, no podemos usar diferentes aproximaciones sino quedara confundido el efecto del periodo con el efecto de las estimaciones. Sin embargo, es posible mantener los dos niveles de referencia para esta medición, y después decidir sobre cuál es el que mejor comportamiento presenta para la evaluación periódica.

4.5 Propuestas para la mejora de las estratificaciones

La superficie forestal definida originalmente para Costa Rica estaba clasificada en seis tipos de ecosistemas forestales que fueron usados como estratos para los efectos del levantamiento de información del INF de Costa Rica (Cuadro 9). El tipo de bosques dominante en cuanto la superficie y a la acumulación de biomasa es el bosque maduro, seguido por el bosque secundario, que en conjunto representan el 73 % de la superficie boscosa del país según el INF de Costa Rica 2014-2015 (Programa REDD/CCAD-GIZ-SICAC 2015). El uso pasto con árboles, que representa un 22.8% de la superficie de interés del INF, es el tercer estrato más relevante. El resto representa cerca del 4 % y contienen los bosques de palmas naturales, los rodales de mangle y las plantaciones forestales (Programa REDD/CCAD-GIZ-SICAC, 2015).

Cuadro 9. Área de los tipos de bosque del INF de Costa Rica

Uso del suelo (tipos de bosques)	Superficie (km²)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Bosque maduro	15 485.83	1 548 583.38	40.05
Bosque secundario	9 408.20	940 820.31	24.33
Rodales de mangle	362.50	36 250.34	0.94
Bosque de palmas	472.19	47 219.26	1.22
Pasto con árboles	12 194.26	1 219 425.65	31.54
Plantaciones forestales	745.97	74 596.85	1.93
Total	38 668.96	3 866 895.79	100.00

Fuente: Inventario Nacional Forestal de Costa Rica 2014-2015 (Programa REDD/CCAD-GIZ-SICAC, 2015).

Los análisis anteriores sugieren que podrían modificarse los estratos o proponer otras clasificaciones que ayuden a mejorar las estimaciones y sus incertidumbres asociadas. Para identificar si es necesaria una sub-estratificación se utilizó la información de capas de zona de vida, áreas protegidas, unidades fitogeográficas y usos de la tierra de Costa Rica. A partir de las capas y las coordenadas geográficas de las parcelas intervinientes en la evaluación 2014-2015 del INF de Costa Rica, se realizaron análisis de varianza dentro de cada estrato utilizando la nueva clasificación obtenida de la capa como subdominio de los estratos ya definidos anteriormente por el IFN de Costa Rica (NREF).

Las capas de información de las unidades fitogeográficas y del uso del suelo generan varias categorías cuando se combinan con los estratos del NREF. Esto implica un bajo número de observaciones para muchas de las nuevas categorías y así el análisis de la varianza queda limitado. La capa de información de zona de vida únicamente tiene cuatro categorías, por lo que no presenta el problema de la baja cantidad de unidades de muestreo para su evaluación como subdominio dentro de cada estrato, al menos para los estratos con más número de parcelas. La clasificación realizada con esta capa encontró diferencias significativas solamente para bosque maduro ($p= 0.0011$, Cuadro 10), pero al usar la prueba de comparación de medias LSD de Fisher para evaluar los grupos de medias que difieren estadísticamente ($p<0.05$) solo separa el bosque pluvial (bp) del resto (Cuadro 11). La zona de vida bosque seco (bs) fue descartada del análisis debido a que únicamente se tenía una parcela en este tipo de bosque.

Cuadro 10. Resultados obtenidos (valores p) del análisis de varianza para la variable biomasa utilizando la sub-estratificación a partir de capas de información geográfica.

Capa de información	Bosque maduro	Bosque secundario	Manglar	Pastizales	Yolillal
Zona de vida	0.0011	0.9573	0.5493	0.3671	0.8513
Área protegida	<0.0001	0.0342	0.8868	0.8792	0.0969

Cuadro 11. Comparación de densidad de carbono promedio por zona de vida para el estrato bosque maduro del inventario nacional forestal de Costa Rica.

Zona de vida	n	Media (Mg/ha)	E.E.	
bp	31	211.59	22.71	a
bmh	60	127.68	16.32	b
bh	24	88.93	25.81	b
bs	1			

Notas: Letras distintas indican diferencias significativas (prueba LSD, $p<0.05$). bp: bosque pluvial; bmh: bosque muy húmedo; bh: bosque húmedo; bs: bosque seco.

La capa de información de área protegida (Cuadro 112) es significativa únicamente para los estratos bosque maduro ($p < 0.0001$) y bosque secundario ($p= 0.0342$).

Cuadro 12. Comparación de las existencias de carbono (Mg/ha) por área protegida y no protegida, para los estratos bosque maduro y bosque secundario del inventario nacional forestal de Costa Rica.

Estrato	Área protegida	Área no protegida	P-value
Bosque maduro	261.37 ^a	96.29 ^b	<0.0001
Bosque secundario	145.28 ^a	73.30 ^b	0.0342

Letras distintas indican diferencias significativas (prueba LSD, $p<0.05$)

Para identificar si existía interacción entre las variables área protegida y zona de vida se realizó un análisis de varianza por estrato declarando zona de vida, área protegida y su interacción como efectos fijos. Para bosque maduro no se obtuvo interacción entre los factores ($p= 0.0928$). Utilizando el valor F como un proxy de la varianza explicada por cada

uno de estos criterios se determinó que área protegida ($F= 36.61$) explicaba más varianza que zona de vida ($F= 6.50$).

Para bosque secundario se obtuvieron resultados similares a los de bosque maduro, siendo área protegida la variable con mayor varianza explicada ($F= 7.80$). Con base en estos resultados la recomendación es utilizar la información de la capa de áreas protegidas para definir las categorías de subdominios para los bosques maduros y primarios.

Se realizaron los cálculos de biomasa por estrato para bosque maduro y bosque secundario usando la subestratificación de área protegida (Cuadro 13) y para todas los demás estratos más esta subestratificación se calcularon los tamaño de muestra para alcanzar incertidumbres de 10 y 15% (Cuadro 14).

Cuadro 13. Estimación de la biomasa y su incertidumbre para los estratos bosque maduro y bosque secundario utilizando la subestratificación por área protegida del inventario nacional forestal de Costa Rica.

Tipo de bosque en área protegida	Estimación	E.E.	n	LI (95%)	LS (95%)	Incertidumbre
Bosque maduro- protegido	261.37	28.42	32	203.41	319.32	22.17
Bosque secundario- protegido	145.28	57.00	7	5.80	284.75	96.01
Bosque maduro- no protegido	96.29	9.20	84	78.00	114.58	18.99
Bosque secundario- no protegido	73.30	9.96	42	53.19	93.41	27.44

Cuadro 14. Estimación de la biomasa e incertidumbre y cálculo del tamaño muestral necesario para una incertidumbre del 10 %y 15% para el inventario nacional forestal de Costa Rica.

Tipo de bosque en área protegida	Estimación	E.E.	n	LI (95%)	LS (95%)	Incertidumbre	10%	15%
Bosque maduro- no protegido	96.29	9.20	84	78.00	114.58	18.99	295	131
Bosque maduro- protegido	261.37	28.42	32	203.41	319.32	22.17	145	65
Bosque Secundario- no protegido	73.30	9.96	42	53.19	93.41	27.44	298	132
Bosque Secundario- protegido	145.28	57.00	7	5.80	284.75	96.01	414	184
Manglar	146.63	24.53	12	92.65	200.61	36.82	129	57
Pastizales	43.26	9.52	49	24.13	62.40	44.23	911	405
Yolillal	126.05	14.16	21	96.51	155.59	23.44	102	45

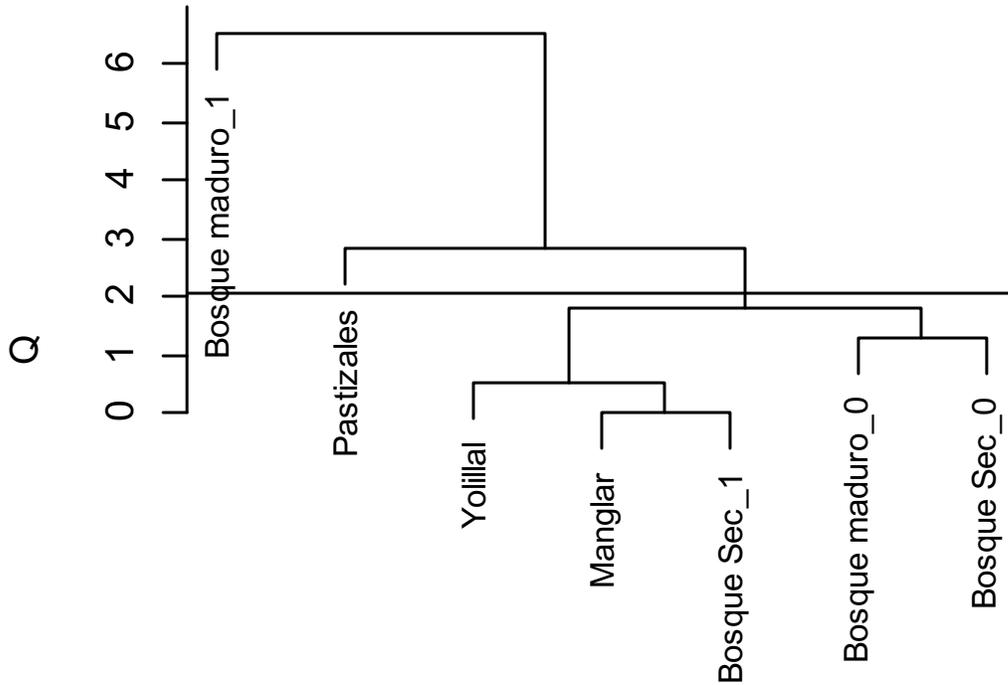


Figura 6. Comparación de medias DGC para la variable biomasa utilizando los estratos definidos a partir de la serie histórica de los NREF y el subdominio área protegida

Con base en los resultados anteriores se definieron cuatro estratos, agrupando algunos de los estratos definidos por el NREF. Los estratos definidos fueron: bosque maduro protegido, bosques monoespecíficos (manglar, yolillal, bosque secundario protegido), bosque no protegido (bosque maduro y secundario no protegido) y pastizales. Se realizó el análisis de varianza y la prueba LSD de Fisher para comparar biomasa promedio entre estos estratos (Cuadro 15).

Cuadro 15. Comparación de medias LSD de Fisher para la variable biomasa para el inventario nacional forestal. Los estratos utilizados son la agrupación realizada por este estudio.

Possible nueva estratificación	Medias	E.E.	
Bosque maduro protegido	261.37	16.41	a
Bosques monoespecíficos	135.59	14.68	b
Bosque no protegido	88.63	8.27	c
Pastizales	43.26	13.26	d

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

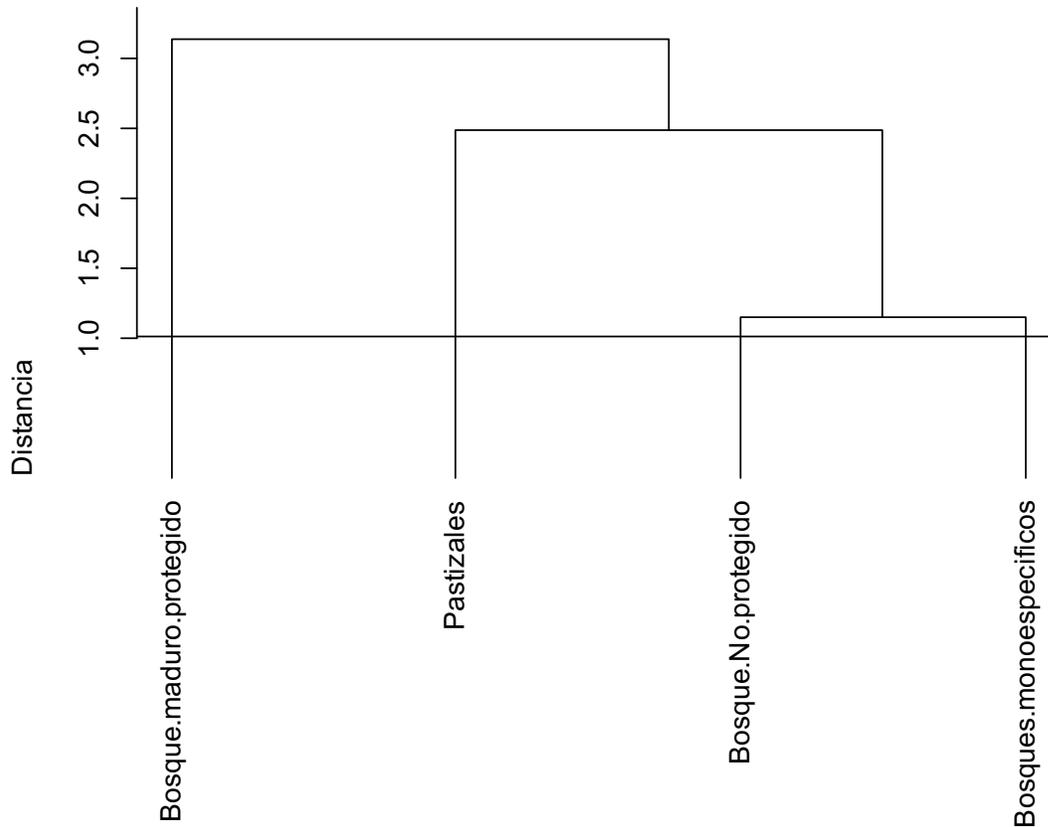


Figura 7. Comparación de medias multivariadas (DGC) para los estratos propuestos por este estudio para el inventario nacional forestal de Costa Rica.

Cuadro 16. Estimación de la biomasa e incertidumbre y cálculo del tamaño muestral necesario para una incertidumbre del 10% y 15% para el inventario nacional forestal de Costa Rica, utilizando los estratos definidos por este estudio.

Estrato	Estimado	E.E.	n	LI (95%)	LS (95%)	Incertidumbre	10%	15%
Bosque maduro protegido	261.37	28.42	32	203.41	319.32	22.17	145	65
Bosque no protegido	88.63	7.02	126	74.74	102.51	15.67	303	135
Bosques monoespecíficos	135.59	13.96	40	107.35	163.83	20.83	163	72
Pastizales	43.26	9.52	49	24.13	62.40	44.23	911	405

4.6 Relación entre variables estructurales y biomasa

Para evaluar la relación que existe entre el promedio de las variables estructurales (DAPm, DMC, ALTURAm) o la suma de las variables estructurales (AB, densidad y volumen) y la biomasa, se utilizaron correlaciones lineales de Pearson. Estas fueron calculadas para toda la información sin importar a que estrato pertenecía y posteriormente se agregó la clasificación de estratos para identificar si existía algún efecto de éste en la correlación. Los resultados

indican que la variable biomasa está correlacionada con todas las variables estructurales a excepción de DAPm ($p=0.2180$). La variable volumen es la variable más correlacionada con biomasa (Cuadro 17).

Cuadro 17. Coeficientes de correlación de Pearson entre biomasa y el resto de variables alométricas evaluadas en el INF de Costa Rica (n=247)

Variable	Pearson	Valor p
DAPm (cm)	0.08	0.2180
DMC (cm)	0.25	0.0001
ALTURAm (m)	0.42	<0.0001
AB (m ² /ha)	0.91	<0.0001
Densidad	0.57	<0.0001
Volumen (m ³ /ha)	0.97	<0.0001

Al evaluar la relación de las variables estructurales y la biomasa por tipo de bosque se obtuvieron resultados similares (Cuadro 18), siendo Volumen ($r=0.97$) y área basal ($r=0.91$) las variables más correlacionadas con la biomasa. La variable DMC, aunque resultó significativa, no tiene una correlación importante con la biomasa ($r=0.25$). Algunas variables como DAPm, DMC, ALTURAm y densidad muestran una tendencia a aumentar la variación de la biomasa al aumentar sus valores (Figura 8a, b, c y e). Esta tendencia es prácticamente nula para la relación biomasa con volumen, y leve para la relación biomasa con AB (Figura 8d y f).

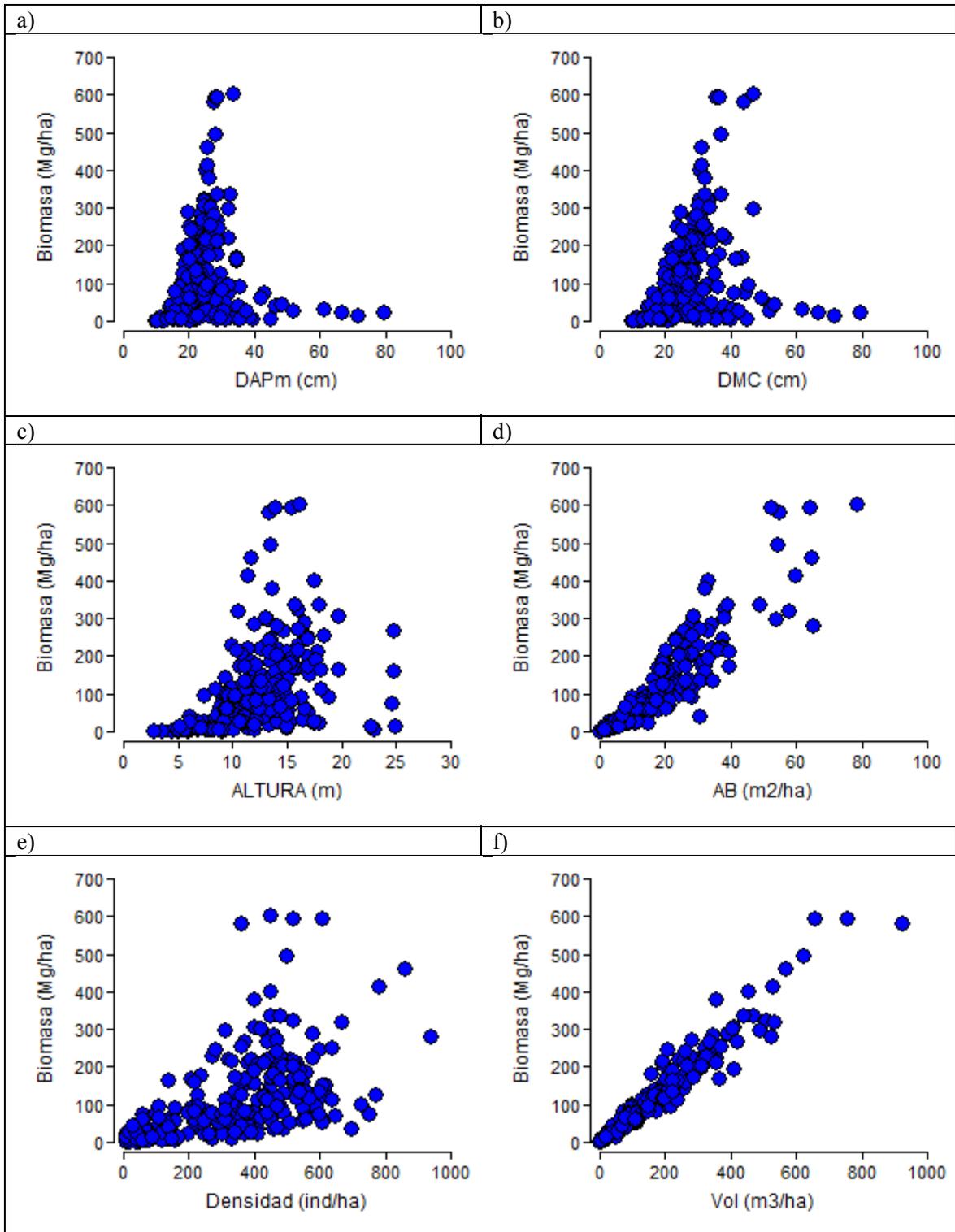


Figura 8. Diagramas de dispersión mostrando la relación entre biomasa y las diferentes variables estructurales obtenida a nivel de parcela, considerando todas las parcelas del inventario forestal nacional de Costa Rica.

Posteriormente se realizó un análisis de componentes principales para representar de forma gráfica las correlaciones entre las variables y su relación con los estratos de bosque. A partir del gráfico de análisis de componentes principales, se puede observar que la variable biomasa está correlacionada con las variables DAP, AB, volumen, densidad y altura. En la Figura 9a se puede observar que el estrato con menor cantidad de biomasa es pastizales seguido de bosque secundario; los estratos manglar, bosque maduro y yolillal son los estratos con mayor cantidad de biomasa.

Cuadro 18. Coeficientes de correlación de Pearson entre biomasa y el resto de variables alométricas evaluadas en el INF de Costa Rica para cada uno de los estratos.

Variable (1)	Variable (2)	Bosque maduro			Bosque Seco			Manglar			Pastizal			Yolillal		
		n	Pearson	p-valor	n	Pearson	p-valor	n	Pearson	p-valor	n	Pearson	p-valor	n	Pearson	p-valor
Biomasa	DAP (cm)	116	0.27	0.0030	49	0.16	0.2854	12	0.77	0.0033	49	-0.01	0.9261	21	-0.25	0.2814
Biomasa	DMC (cm)	116	0.50	<0.0001	49	0.26	0.0691	12	0.76	0.0043	49	0.05	0.7258	21	-0.16	0.4935
Biomasa	ALTURA (m)	116	0.39	<0.0001	49	0.32	0.0235	12	0.74	0.0056	49	0.44	0.0017	21	0.43	0.0512
Biomasa	AB (m ² /ha)	116	0.93	<0.0001	49	0.95	<0.0001	12	0.84	0.0006	49	0.85	<0.0001	21	0.72	0.0002
Biomasa	Densidad (ind/ha)	116	0.51	<0.0001	49	0.61	<0.0001	12	0.01	0.9661	49	0.63	<0.0001	21	0.58	0.0055
Biomasa	Vol (m ³ /ha)	116	0.97	<0.0001	49	0.95	<0.0001	12	0.94	<0.0001	49	0.97	<0.0001	21	0.96	<0.0001

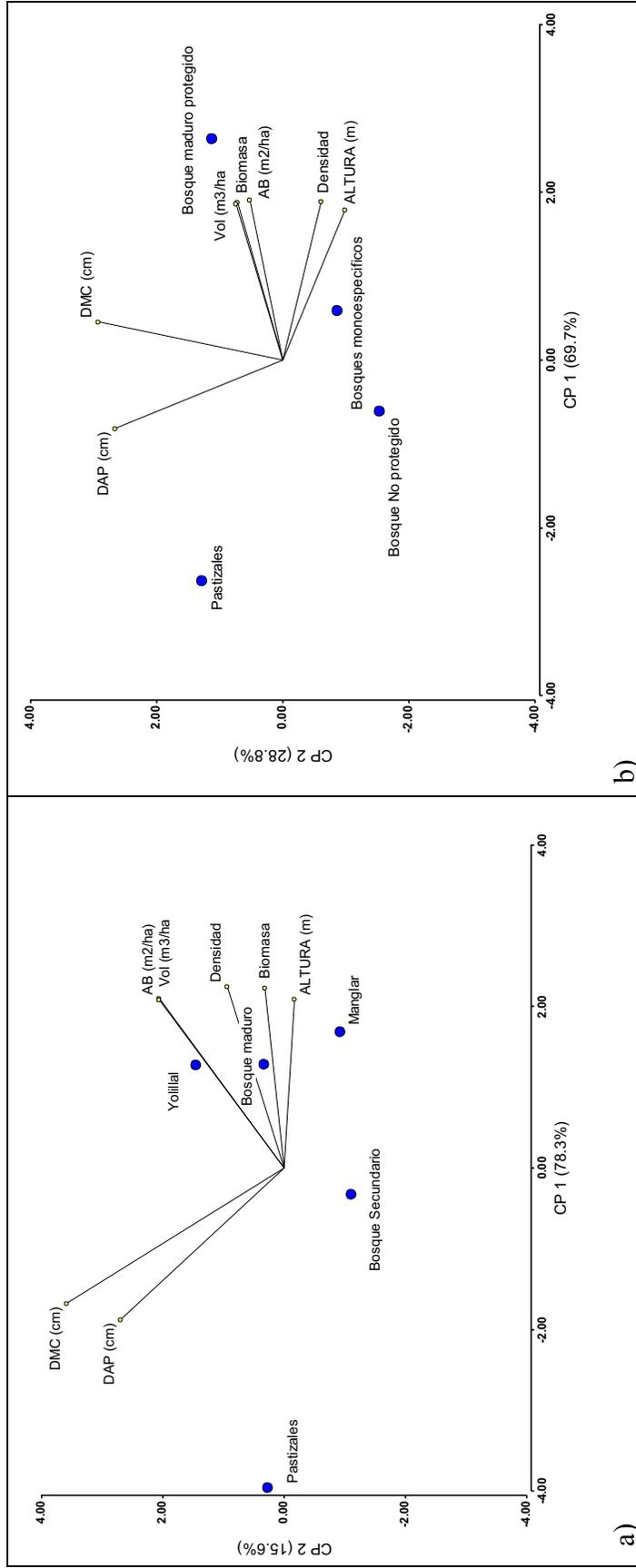


Figura 9. Gráficos biplot obtenidos mediante un análisis de componentes principales de las variables estructurales y biomasa para cada uno de los estratos usando a) la clasificación del INF de Costa Rica y b) la clasificación propuesta en este estudio considerando todas las parcelas del inventario forestal nacional de Costa Rica

5. Recomendaciones

- Estimar el porcentaje de área efectivo de muestreo de la parcela ayudará a obtener mejores estimaciones y disminuir la incertidumbre.
- Utilizar diferentes ecuaciones alométricas o ecuaciones más específicas para la estimación de biomasa.
- Identificar el estado del árbol (muerto, vivo, muerto con ramas, muerto sin ramas)
- Identificar los distintos hábitos de crecimiento (árbol, arbusto, palma, helecho, liana)
- Identificar si existen parcelas pertenecientes a más de un estrato de bosque.

6. Referencias bibliográficas

- Andrade, H. (1999). Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 84p.
- Andrade, H. J. (2007). Growth and interspecific interactions in young silvopastoral systems with native timber trees in the dry tropics of Costa Rica. Tesis PhD. CATIE University of Wales, Turrialba, Costa Rica. 250p.
- Asner, Gregory P. sf. Measuring Carbon Emissions from Tropical Deforestation: An Overview. Environmental Defense Fund. 11p. Disponible en línea https://www.edf.org/sites/default/files/10333_Measuring_Carbon_Emissions_from_Tropical_Deforestation--An_Overview.pdf
- Balzarini, MG; Gonzal. ez, L; Tablada, M; Casanoves, F; Di Rienzo, JA; Robledo, CW. 2008. Infostat: Manual del Usuario. Córdoba, Argentina, Editorial Brujas. 336 p.
- Brown S, A Gillespie, A Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. Forest Science. 35(4):881-902.
- Brown, S., 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. (Forest Resources Assessment Publication. Forestry Papers 134). FAO, Rome.
- Casanoves, F; Di Rienzo, JA; Pla, L. 2010. FDiversity user manual: Statistical software for the analysis of functional diversity. Córdoba, Argentina. Disponible en línea: www.fdiversity.nucleodiversus.org
- Casanoves, F; Pla, LE; Di Rienzo. JA; Díaz, S. 2011. FDiversity: a software package for the integrated analysis of functional diversity. Methods in Ecology & Evolution. 2:233-237.
- Casanoves, F.; Cifuentes Jara, M. Chacón; M. 2017. Estimación del carbono a partir de inventarios forestales nacionales Buenas prácticas para la recolección, manejo y análisis de datos. Serie técnica. Informe técnico No. 140. CATIE. Turrialba-Costa Rica. 109p.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 2015. Informe de resultados del taller: “Definiendo la Reducción de Emisiones por Degradación Forestal en el Marco de REDD+ en Costa Rica”. FONAFIFO y CATIE. 8 de agosto. San José, Costa Rica. 9p.
- Chave, J.; Andalo, C.; Brown, S.; Cairns, D.; Chambers, J.; Eamus, D.; Folster, H.; Fromard, F.; Higuchi, N.; Kira, T.; Lescure, P.; Nelson, B.; Ogawa, H.; Puig, H.; Riera, B.; Yamakura, T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. Ecologia. 145:87-99.
- Clark, D.A., Brown, S., Kicklighter, D.W., Chambers, J. Q., Thomlinson, J.R., Ni, J. et al. 2001. Net Primary Production in Tropical Forests: An Evaluation and Synthesis of Existing Field Data. Ecol. Appl. 11:371384.
- Clark, D.A., 2007. Detecting Tropical Forests’ Responses to Global Climatic and Atmospheric Change: Current Challenges and a Way Forward. Biotropica. 39(1):4–19 (doi:10.1111/j.1744-7429.2006.00227.x).
- Coomes David A, Allen Robert B, Scott Neal A, Goulding Chris and Beets Peter. 2002. Designing systems to monitor carbon stocks in forests and shrublands. Forest Ecology and Management. 164(1):89-108

- FAO. 2011. Assessing forest degradation. Towards the development of globally applicable guidelines. Forest Resources Assessment Working Paper. FAO. Roma, Italia. 109p. Disponible en línea: <http://www.fao.org/3/a-i2479e.pdf>
- FAO. 2015. Technical considerations for Forest Reference Emission Levels and/or Forest Reference Level construction for REDD+ under the UNFCCC. UNREDD+ Program. FAO/UNDP/UNEP 41 p.
- FONAFIFO (Fondo Nacional de Financiamiento Forestal). 2013. Emission Reductions Program Idea Note (ER-PIN). FONAFIFO. San José, Costa Rica. 117p.
- Fonseca, W; Alice, F; Rey, J. 2009. Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. Revista Bosque Valdivia. 30(1):36-47.
- Forest Carbon Partnership Facility (FCPF). 2013. Marco metodológico del Fondo de Carbono del Fondo Cooperativo para el Carbono de los Bosques. 46p.
- Forest Carbon Partnership Facility (FCPF). 2015. ER-PD TAP Review of Costa Rica. FCPF. 46p.
- Gobierno de Costa Rica. 2015. Contribución prevista y determinada a nivel nacional de Costa Rica. Ministerio de Ambiente y Energía. San José, Costa Rica. 19p.
- GOFC-GOLD. 2009. Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures for monitoring, measuring and reporting. GOFC-GOLD Report version COP 14-2. GOFC-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada. 185 p.
- GOFC-GOLD. 2015. A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation. sourcebook COP 21, version 1. 268p. Disponible en línea: http://www.gofcgold.wur.nl/redd/sourcebook/GOFC-GOLD_Sourcebook.pdf
- Instituto Meteorológico Nacional. 2014. Mapa de cobertura de la tierra de Costa Rica para el año 2012. San José, Costa Rica
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2003. Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Programa del IPCC sobre Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero. Organización Meteorológica Mundial (OMM), Geneva, Suiza.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. Directrices del IPCC para los Inventarios de Gases de Efecto Invernadero; Volumen 4 (Agricultura, Silvicultura y otros usos de la tierra). IGES, Hayama Kanasawa, Japón.
- MacDicken, K.G. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. USA, Winrock International Institute for Agricultural Development. 87p.
- Montero, M; Kanninen, M. 2002. Biomasa y Carbono en Plantaciones de Terminalia Amazonia en la zona Sur de Costa Rica. Revista Forestal Centroamericana. 39-40:40-55.
- Montero, M; Montagnini, F. 2005. Modelos alométricos para la estimación de biomasa en diez especies nativas en plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica. Recursos Naturales y Ambiente. 45:112-119.
- Nogueira, E.M.; Nelson, B.W.; Fearnside, P.M.; Franc_a, M.B.; Oliveira, A.C.A.D. 2008. Tree height in Brazil's "arc of deforestation": shorter trees in South and Southwest Amazonia imply lower biomass. Forest Ecology and Management. 255:2963–2972.

- Organización Internacional de las Maderas Tropicales (OIMT). 2002. Directrices de la OIMT para la restauración, ordenación y rehabilitación de bosques tropicales secundarios y degradados. Serie de políticas forestales no 13. Osaka, Japón.
- Ortiz, E. 1997. Refinement and evaluation of two methods to estimate aboveground tree biomass in tropical forest. Tesis para el grado de Doctor of Philosophy. New York, USA; State university of New York. 116p.
- Pearson, T., Walker, S., Brown, S. 2005. Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects. Winrock International. 57p.
- Pedroni, L.; Espejo, A.; Villegas, J.F. 2015. Nivel de referencia de emisiones y absorciones forestales de Costa Rica ante el Fondo de Carbono de FCPF: metodología y resultados. Gobierno de Costa Rica. San José, Costa Rica. 223p.
- Scheaffer, R. L., Mendenhall, W. & Ott, L. (1987). Elementos de muestreo. Grupo editorial Iberoamérica. México. 332p.
- Segura, M. & Kanninen, M. (2005). Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica* 37(1):2-8.
- Segura, M; Andrade H. 2008. ¿Cómo hacerlo? ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería de las Américas*. 46:89-96.
- UNFCCC. 2006 Background paper for the workshop on reducing emissions from deforestation in developing countries, August 2006, Rome, Italy. Part I. Scientific, socio-economic, technical and methodological issues related to deforestation in developing countries Working paper No.1 (a)
- Villanueva, C; Ibrahim, C; Harvey, C; Esquivel, H. 2003. Tipología de finca con ganadería bovina y cobertura arbórea en pasturas en el trópico seco de Costa Rica. *Agroforestería de las Américas*.10:39-40.
- Zarnoch, S.J.; Bechtold, W.A. 2000. Estimating mapped-plot forest attributes with ratios of means. *Canadian Journal of Forest Research*. 30:688-697.

7. Anexos

7.1 Anexo 1. Descripción de la base de datos por arboles

La base de datos “arboles_INF_CR”, tiene la información de los árboles que quedaron después de la depuración y control de calidad realizada siguiendo los criterios mencionados en el informe. La información provenía de dos bases de datos de Excel, descritas a continuación, que fueron concatenadas para el proceso de depuración y estimación de biomasa. La base de datos cuenta con 14 229 registros.

7.1.1 Descripción de variables

Base: Indica la base de datos de la que proviene la información

Orden: Número consecutivo del orden inicial de los datos

NUMERO Parcela1: Código número por parcelas

Zone: Zona de vida de Holdridge

Cod_biom: Código que indica la ecuación alométrica a utilizar para estimar la biomasa

OTRO Hábito: Variable clasificatoria que indica el hábito de crecimiento

DAP: dap

EST_DAP: Estandarización del dap por especie

Revisar_alt: Variable que indica los arboles a los que se les identificaron inconsistencias en la altura

ALTURA: Altura

HC: Altura comercial

Factor Exp: Factor de extrapolación a hectáreas

GE: Densidad de madera

TB: Tipo de bosque INF

BiomLianas: Biomasa estimada únicamente para lianas

Biomasa: Biomasa estimada para árboles y palmas

Biom_todos: Biomasa total aérea

Cobertura: Tipo de bosque de los NREF

7.2 Descripción de la base de datos por parcelas

La base de datos parcelas INF tiene la información de 247 parcelas depuradas.

7.2.1 Descripción de variables

Id: Código único del INF

Numero Parcela 1: Código único para identificar las parcelas

DAP: dap

DMC: DMC

ALTURA: Altura en metros

AB: Área basal

Densidad: Densidad

Vol: Volumen

Biomasa: Biomasa estimada por el IFN

Carbono: Carbono

CO2: CO₂

Cobertura: Estratos definidos por los NREF

Estrato INF: Estratos definidos por el INF

Zona: Zona

Area protegida: Si la parcela se encuentra (1) o no (0) en un área protegida

UFG: Unidades fitogeográficas

UsoSuelo: Categorías obtenidas del mapa de uso del suelo

Zone: Zona de vida de Holdridge

Tipo_Zone: Combinación de las categorías Estrato NREF y Zona de vida

Tipo_Areaprotegida: Combinación de las categorías estrato NREF y área protegida.

