



Ambiente



IDEAM

CÁLCULO DE LOS FACTORES DE EMISIÓN PARA LOS SUMIDEROS FORESTALES DE CARBONO

BIOMASA AÉREA, BIOMASA SUBTERRÁNEA,
CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO Y DETRITOS DE MADERA,
A PARTIR DE LOS DATOS DEL INVENTARIO FORESTAL NACIONAL



GUSTAVO FRANCISCO PETRO URREGO

Presidente de la República de Colombia

FRANCIA ELENA MÁRQUEZ MINA

Vicepresidenta de Colombia

MARÍA SUSANA MUHAMAD GONZÁLEZ

Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

MAURICIO CABRERA LEAL

Viceministro de Políticas y Normalización
Ambiental

LILIA TATIANA ROA AVENDAÑO

Viceministra de Ordenamiento Ambiental
del Territorio

Consejo Directivo

MARÍA SUSANA MUHAMAD GONZÁLEZ

Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

FRANCISCO JAVIER CANAL ALBÁN

Viceministro de Ordenamiento Ambiental del
Territorio

NÉSTOR ROBERTO GARZÓN CADENA

Director de Cambio Climático y Gestión del
Riesgo (e)

FERNEY CAMACHO

Director de Infraestructura - Ministerio de
Transporte

PAOLA RICAURTE AYALA

Asesora de la Dirección de Ambiente y
Desarrollo Sostenible - Departamento
Nacional de Planeación (DNP)

SANDRA LILIANA MORENO MAYORGA

Directora de la Dirección Técnica
Geoestadística - Departamento Administrativo
Nacional de Estadística (DANE)

HECNEY ALEXCEVITH ACOSTA

Director general - Corporación Autónoma
Regional de Santander (CAS)

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – Ideam

GHISLIANE ECHEVERRY PRIETO

Directora general

JUAN FERNANDO ACOSTA MIRKOW

Secretario general

FABIO ANDRÉS BERNAL QUIROGA

Subdirector de Hidrología

ELIZABETH PATIÑO CORREA

Subdirectora de Estudios Ambientales

LINA MARÍA CABALLERO VILLALOBOS

Subdirectora de Ecosistemas e
Información Ambiental

TC. JORGE GIOVANNI JIMÉNEZ SÁNCHEZ

Subdirector de Meteorología

ÍNGRID TATIANA SIERRA GIRALDO

Jefe de la Oficina del Servicio de
Pronóstico y Alertas

CÉSAR AUGUSTO SÁNCHEZ WALDRON

Jefe de la Oficina Asesora de Planeación

WILMER ESPITIA MUÑOZ

Jefe de la Oficina de Informática

GILBERTO ANTONIO RAMOS SUÁREZ

Jefe de la Oficina Asesora Jurídica

MARÍA EUGENIA PATIÑO JURADO

Jefe de la Oficina de Control Interno

Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental

LINA MARÍA CABALLERO VILLALOBOS

Subdirectora de Ecosistemas e Información Ambiental

Autores

CLAUDIA PATRICIA OLARTE VILLANUEVA

JORGE ANDRÉS RODRÍGUEZ TORO

RUBÉN DARÍO JURADO BASTIDAS

JUAN SEBASTIÁN HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental - Ideam

Colaboración técnica

JAVIER ALEXANDER ROMERO

Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental - Ideam

Cítese como:

Olarte, C. P., Rodríguez, J. A., Jurado, R. D., y Hernández, J. S. (2024). *Cálculo de los factores de emisión para los sumideros forestales de carbono: biomasa aérea, biomasa subterránea, carbono orgánico del suelo y detritos de madera, a partir de los datos del Inventario Forestal Nacional*. Ideam.

ISBN (digital):

978-958-5489-30-1

Publicación aprobada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.

Bogotá, D. C., octubre de 2024.

Distribución gratuita.

Todos los derechos reservados. Los textos pueden ser usados parcial o totalmente citando la fuente. Su reproducción total o parcial debe ser autorizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.

© Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.

Producción y gestión editoriales

ANDRÉS FELIPE TAPIERO RÍOS

Grupo de Comunicaciones y Prensa

Corrección de estilo

SEBASTIÁN URIBE RODRÍGUEZ

Grupo de Comunicaciones y Prensa

Diseño editorial y diagramación

LUISA FERNANDA RODRÍGUEZ ARIAS

Grupo de Comunicaciones y Prensa

Foto de carátula

© Archivo fotográfico del Inventario Forestal Nacional - Ideam.

1.	Introducción	6
2.	Contexto general del proyecto del Inventario Forestal Nacional	7
3.	Metodología de cálculo	11
3.1.	Limpieza de datos	11
3.2.	Corrección de colección botánica	14
3.3.	Post-estratificación	14
3.4.	Estimadores	15
3.5.	Factores de expansión	17
3.6.	Calibración	17
3.7.	Cálculos dasométricos, de suelos y detritos de madera	18
4.	Resultados	24
4.1.	Contenidos de biomasa aérea (AGB), subterránea (BRG) y total en los ecosistemas boscosos de Colombia	25
4.2.	Contenidos de carbono almacenado en la biomasa aérea (AGB), subterránea (BRG) y total en los ecosistemas boscosos de Colombia	25
4.3.	Biomasa en árboles muertos en pie (MP), tocones muertos (TM), detritos finos de madera (DFM) y detritos gruesos de madera (DGM) en bosques de Colombia	26
4.4.	Carbono acumulado en árboles muertos en pie (MP), tocones muertos (TM), detritos finos de madera (DFM) y detritos gruesos de madera (DGM) en bosques de Colombia	26
4.5.	Carbono orgánico del suelo (COS) en los ecosistemas boscosos de Colombia	26

5.	Consideraciones	27
6.	Referencias	27
Anexos		
1.	Cálculo de los niveles de incertidumbre asociada al IFN	29
1.1.	Funciones de probabilidad empleadas	30
A.	Incertidumbre en área basal ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$)	31
B.	Incertidumbre en volumen ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)	32
C.	Incertidumbre del carbono acumulado en biomasa aérea y subterránea (Mg ha^{-1})	33
D.	Incertidumbre del carbono acumulado en detritos finos (Mg ha^{-1})	34
E.	Incertidumbre del carbono acumulado en detritos gruesos (Mg ha^{-1})	35
F.	Incertidumbre del carbono acumulado en árboles y tocones muertos (Mg ha^{-1})	36
G.	Incertidumbre en carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1})	37
	Glosario de términos y acrónimos	38

Lista de figuras

Figura 1. Unidades de muestreo del IFN	9
Figura 2. Unidades de observación del IFN (subparcelas)	10
Figura 3. Muestreo de transectos lineales para detritos de madera en el IFN	22
Figura 4. Esquema de transecto para muestreo de detritos en una subparcela	22
Figura 5. Ubicación geográfica de los 953 conglomerados implementados en la fase 2015-2022 del IFN	24

Lista de tablas

Tabla 1. Escenarios de tamaños de muestra	9
Tabla 2. Tamaños de muestra por región	10
Tabla 3. Opciones para asignar (corregir) valores faltantes o identificados como erróneos en la base de datos del IFN	12
Tabla 4. Principales algoritmos desarrollados en R, para la revisión y depuración de la base de datos del IFN	13
Tabla 5. Superficie en hectáreas de bosque, no bosque y sin información para cada una de las regiones naturales de Colombia, según el mapa de bosques y no bosques del año 2022	15
Tabla 6. Parámetros del modelo de Weibull, por región y hábito de crecimiento	19

Tabla 7. Variables para evaluar en cada pieza de detritos caídos de madera	23
Tabla 8. Términos y cálculos realizados en las muestras de detritos caídos	23
Tabla 9. Cantidad de biomasa aérea (AGB), subterránea (BRG) y total calculada para individuos con un DAP ≥ 5 cm, por región y estrato	25
Tabla 10. Cantidad de carbono en la biomasa aérea (AGB), subterránea (BRG) y total calculada para individuos con un DAP ≥ 5 cm, por región y estrato	25
Tabla 11. Cantidad de biomasa en necromasa (MP y TM, DFM y DGM) por región y estrato	26
Tabla 12. Cantidad de carbono acumulado en necromasa (MP y TM, DFM y DGM) por región y estrato	26
Tabla 13. Cantidad de carbono orgánico acumulado en el suelo (COS) por región y estrato	26

1. Introducción

Los ecosistemas de bosque cubren aproximadamente 4.060 millones de hectáreas de la superficie terrestre (FAO, 2021). En Colombia, se encuentran 59,7 millones de hectáreas de bosque natural, que equivalen al 52,3 % del territorio continental e insular (Olarte et al., 2021). Por lo tanto, resulta de gran importancia desarrollar estrategias institucionales que permitan no solo al sector ambiental, sino al Estado en general, disponer de información sobre su estado, composición, dinámica y amenazas, de manera que sea posible efectuar una adecuada planificación en torno a dichos ecosistemas.

En este contexto, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Minambiente, como ente rector del sector ambiental colombiano y bajo la coordinación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam, inició, desde el año 2007, el desarrollo del programa de monitoreo de bosques y áreas forestales. Una de las principales proposiciones de este programa estaba centrada en el desarrollo del Inventario Forestal Nacional - IFN, como herramienta fundamental del conocimiento sobre la oferta y estado de los recursos boscosos.

Con el fin de avanzar en el tema en conformidad con la Ley 99 de 1993, el Ideam en coordinación con las entidades del Sistema Nacional Ambiental - SINA y la colaboración de diferentes instituciones nacionales e internacionales, diseñaron el marco rector de implementación del IFN y una serie de protocolos, guías, manuales, formatos, entre otros, que permitieron la puesta en marcha del primer ciclo de implementación o línea base del Inventario Forestal Nacional, ejercicio que inició en el año 2015 y culminó en su fase de campo en 2023.

Como herramienta de monitoreo, el Inventario Forestal Nacional es un instrumento que provee información fundamental sobre la cobertura, composición, estructura y diversidad forestal. A partir de esta

información, se calcula el carbono almacenado en los bosques dentro de sus diferentes compartimientos: biomasa aérea, biomasa subterránea, necromasa y suelos. Además, este instrumento es el que se emplea para cuantificar las emisiones potenciales de gases efecto invernadero por actividades de deforestación y degradación de bosques.

Para el desarrollo de la cuantificación de la biomasa forestal, no solo se requiere contar con los datos, sino depurarlos, validarlos, procesarlos y analizarlos. Este proceso demanda una serie de etapas de trabajo con expertos en biometría forestal, por medio de las cuales se asegura no solo la calidad de los datos, sino su consistencia, exhaustividad y rigor estadístico, cuestión que demanda tiempo y esfuerzo institucional.

Con base en lo anterior y luego de efectuar un análisis de los datos disponibles a la fecha que permitieran soportar las decisiones sobre los niveles de referencia forestal en Colombia, se tomó la decisión de trabajar con una serie de datos provenientes del IFN del periodo (2015-2022). A partir de estos datos, se calcularon los contenidos de carbono en cuatro sumideros forestales: biomasa aérea, biomasa subterránea, carbono orgánico del suelo y detritos de madera (necromasa), cuyas estimaciones se obtienen tanto a nivel nacional como regional.

En este documento, se describe tanto la metodología de cálculo empleada en la estimación de los factores de emisión como los resultados obtenidos de ella a partir del análisis de los datos de campo del IFN.

Por último, es imperativo mencionar que en la medida en la que se robustezca la cantidad de datos incluidos en los cálculos, se mejorarán los resultados derivados en las estimaciones asociadas. Por lo tanto, la siguiente versión del análisis entregará productos con mayor exactitud, debido a que contiene un mayor número de datos.



2. Contexto general del proyecto del Inventario Forestal Nacional

El Inventario Forestal Nacional - IFN es una iniciativa a gran escala, cuya puesta en marcha en campo se inició en el año 2015. El Decreto 1655 de 2017 define al IFN, como la operación estadística que, mediante procesos, metodologías, protocolos y herramientas, realiza el acopio, almacenamiento, análisis y difusión de datos cuantitativos y cualitativos, que permiten conocer el estado actual y la composición de los bosques del país y sus cambios en el tiempo.

Desde el inicio de la fase de ejecución en campo en el año 2015, el proyecto ha enfrentado diferentes retos institucionales, operativos, logísticos y presupuestales, que lo han hecho complejo de implementar en el territorio. Por estas razones, su desarrollo ha llevado más de siete años, del 2015 al 2023, descontando un año de receso durante la pandemia. Su mayor implementación ocurrió durante el periodo del 2021 al 2023 con el equivalente al 58 %.

El Inventario Forestal Nacional de Colombia está basado en un diseño geoestadístico y en una metodología estandarizada para la toma de datos en campo con base en la Norma Técnica de la Calidad del Proceso Estadístico (NTC PE) 1000:2020, la cual determina los lineamientos nacionales para certificar los datos como oficiales.

El tipo de muestreo empleado en el IFN de Colombia se estructura a partir de un muestreo probabilístico, aleatorio simple, post-estratificado¹ y de conglomerados de áreas, con el universo de estudio compuesto por toda la superficie continental e insular del país. El muestreo es probabilístico debido a que las unidades de muestreo tienen una probabilidad conocida y, además, poseen una probabilidad mayor a cero de ser seleccionada.

El muestreo aleatorio simple de conglomerados (MASC) se emplea debido a que la selección de los puntos de muestra (conglomerados) se realiza utilizando un marco geoestadístico (MGE) a través del método de coordinado negativo, por medio del cual se generan puntos aleatorios que son elegidos para conformar la muestra dentro del universo de estudio y el espacio geográfico correspondiente. Esto permite,

a su vez, planificar la logística de acceso a los puntos y desarrollar el operativo de campo, sobre el cual se realizan los análisis estadísticos para planificar el proceso de muestreo y el operativo de campo.

El diseño de muestreo es post-estratificado, porque se consideran particiones poblacionales posteriores al levantamiento de campo. Las variables de la post-estratificación son: i) las categorías bosque y no bosque y ii) la región natural. Estas dos variables se tratan como post-estratos y no como estratos del diseño inicial, dado que en la práctica un conglomerado puede ser identificado *a priori* como bosque y posteriormente, al levantamiento de campo, puede corresponder a la categoría de no bosque y viceversa. De igual forma, sucede con la región natural por cambios político administrativos (Olarte et al., 2021).

El marco geoestadístico del Inventario Forestal Nacional está conformado por líneas imaginarias trazadas en el territorio continental e insular colombiano, que posibilitan y consolidan la definición del modelo estadístico, y, por lo tanto, permite la selección de una muestra ubicada geográficamente. La construcción de las líneas imaginarias se levanta con los parámetros oficiales definidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, lo que garantiza la compatibilidad de los productos cartográficos en el contexto latinoamericano y mundial; en consecuencia, facilita el intercambio de información geográfica básica y temática. El proceso de construcción de la grilla de equidistancias se basa en el tamaño de muestra calculado para la implementación del IFN (1.479 conglomerados). A partir de este y gracias a los análisis y modelos simulados a través de la herramienta Fried y de pruebas espaciales, se busca un tamaño de grilla óptimo para soportar la muestra definida (Olarte et al., 2021).

La unidad de muestreo en campo corresponde a un conglomerado, consistente en un arreglo en cruz de cinco (5) parcelas circulares de 0,0707 hectáreas cada una, distanciadas entre los centros de cada subparcela en 80 m; así, se tiene un área total de 0,3535 hectáreas por conglomerado (ver Figura 1).

¹ Para esta publicación se ha unificado como criterio editorial la escritura de las formas "post-estrato", "post-estratificación" y "post-estratificado", debido a su uso generalizado en el contexto científico de aplicación y consulta; sin embargo, como se indica en la *Ortografía de la lengua española*, lo aconsejable en estos casos sería usar el prefijo "pos" y unirlo a la palabra que acompaña (es decir, "posestrato", "posestratificación" y "posestratificado").

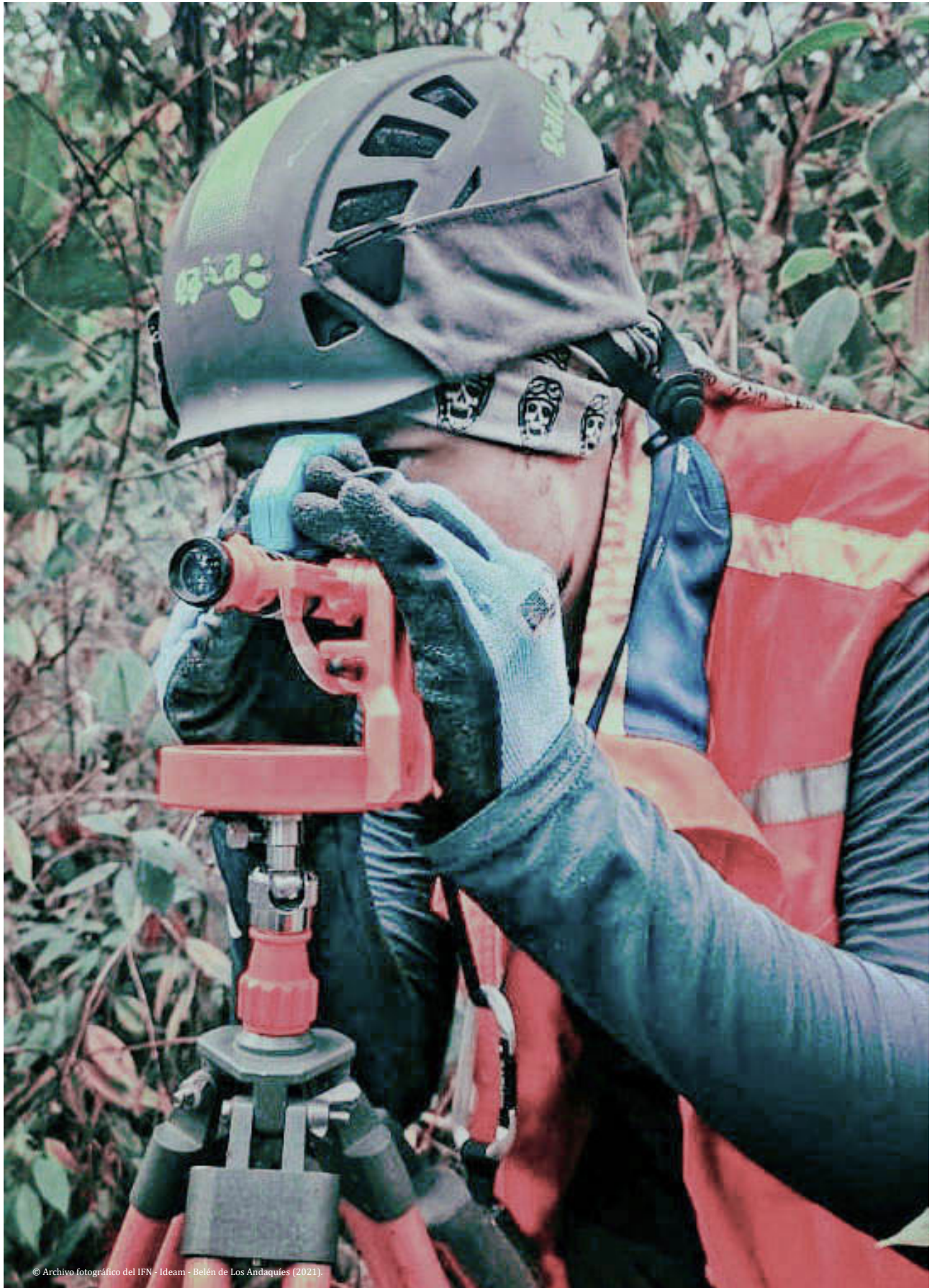
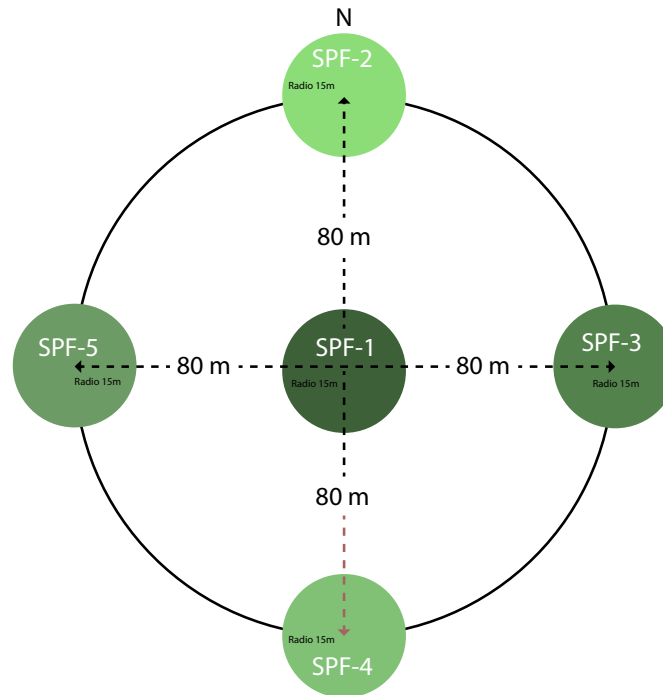


Figura 1. Unidades de muestreo del IFN



Fuente: Olarte et al. (2021).

Para el cálculo de tamaño de muestra, fueron probadas tres variables que el equipo del IFN consideró las técnicamente más importantes. Estas corresponden al diámetro normal a 1,30 m (DAP), el área basal (AB) y el volumen. Para su obtención fue empleada la siguiente fórmula:

$$n = \frac{S^2}{\bar{y}_U^2 \cdot cve^2 + \frac{S^2}{N}}$$

con $S^2 = \sigma^2 DEFF$

De donde:

n es el tamaño de muestra (conglomerados a levantar en campo).

σ^2 es la varianza de la variable guía (volumen, AB, DAP).

$DEFF$ es el efecto de diseño, relación entre la varianza del diseño propuesto MASC y el MAS, en este caso y de acuerdo con datos de campo de levantamientos forestales disponibles se estima en 1.5.

$\bar{y}_U$ es la media de la variable guía (volumen, AB, DAP).

cve es el error muestral este caso se proponen tres escenarios 5,6 y 7 %.

N es el tamaño poblacional (total de conglomerados teóricos igual a 322.657.672).

Con lo cual se obtienen tres escenarios de tamaño de muestra (Tabla 1):

Tabla 1. Escenarios de tamaños de muestra

Variable	CVE = 5 %	CVE = 6 %	CVE = 7 %
Volumen	1.479	1.027	754
AB	562	390	287
DAP	559	389	286

Fuente: Olarte et al. (2021).

De acuerdo con los escenarios anteriores, se definió trabajar con la variable volumen y un CVE del 5 %, con el cual se obtiene un tamaño de muestra de 1.479 conglomerados.

La distribución de la muestra se realiza por región natural, por asignación proporcional al área de cada región, como se observa en la Tabla 2:

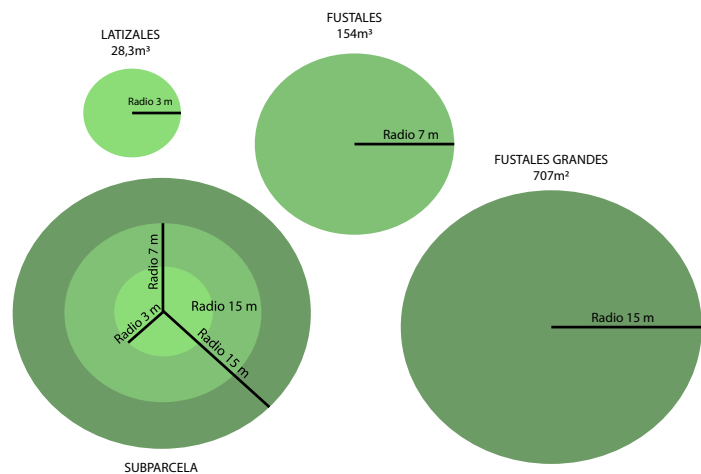
Tabla 2. Tamaños de muestra por región

Región	Tamaño muestra
Amazonía	595
Andes	379
Caribe	200
Orinoquía	218
Pacífico	87
Total	1.479

Fuente: Olarte et al. (2021).



La toma de los datos biométricos en campo ha implicado delimitar tres áreas anidadas de medición en cada subparcela (ver Figura 2): i) latizales: individuos de 2,5 a 10 cm de diámetro ($28,3 \text{ m}^2$ de área de medición), ii) fustales: individuos de 10 a 30 cm de diámetro ($153,9 \text{ m}^2$ de área de medición) y iii) fustales grandes: individuos con diámetros mayores a 30 cm ($706,9 \text{ m}^2$ de área de medición).

Figura 2. Unidades de observación del IFN (subparcelas)

Fuente: Olarte et al. (2021).

Dentro de cada subparcela y de acuerdo con el manual de campo del IFN, versión 5.2 (Ideam, 2021), se realiza el registro de individuos a través de catorce formatos de campo, a través de los cuales se registran datos de localización del conglomerado, ruta al campamento, ruta al conglomerado, esquema del conglomerado, subparcelas, registro y medición de individuos, colección botánica, envío de muestras botánicas al herbario, muestreo de suelos, envío muestras de suelo al laboratorio, muestreo de detritos de madera en transectos, envío de detritos de madera al laboratorio, equipos y materiales, seguimientos a actividades, entre otros formatos de uso exclusivo de los laboratorios.

3. Metodología de cálculo

La estimación de las reservas de carbono se realiza a partir de los datos recolectados en los levantamientos de conglomerados del Inventario Forestal Nacional, que, para este ejercicio, empleó un conjunto de datos del periodo 2015-2022 y que corresponden a 953 conglomerados, distribuidos en todo el país.

Con los datos seleccionados, y aun cuando se han aplicado a lo largo del proceso controles que permiten garantizar la calidad de información recolectada en campo, se hace necesario efectuar una serie de etapas que permitan la preparación de los datos para las estimaciones derivadas de ellos.

A continuación, se describen las principales fases del proceso:

3. 1. Limpieza de datos

El IFN registra datos en diferentes formularios para el trabajo de campo que son diligenciados a mano en hojas de papel o en dispositivos de captura móvil. Antes de su diligenciamiento en la plataforma de captura, los formatos pasan por una serie de revisiones a cargo de los supervisores de campo, quienes en una primera revisión, aplicando protocolos para control y crítica de la información, detectan errores que se hayan presentado durante la medición o el registro del dato en el formulario, el uso incorrecto de los equipos de medición, la interpretación errónea del manual de campo o la selección errónea de una opción para codificar una variable (Ideam y UNAL, 2021).

Posteriormente, toda la información se digitaliza en una plataforma de captura de datos (Open Foris), que tiene una estructura y diseño similar a la de los formularios de campo o se transcribe a formato digital en hojas de cálculo de Ms Excel. En cualquiera de las dos opciones, se tienen dispuestos validadores que permiten disminuir la probabilidad de incurrir en errores o en pérdida de información, con lo que se busca agilizar el procesamiento de la información (Ideam y UNAL, 2021). No obstante, debido al volumen de información capturada, es probable que se evidencien posteriormente errores o inconsistencias en la base de datos, que no se detectaron en las primeras revisiones.

Las principales fuentes de error o inconsistencias en la base de datos del IFN se pueden dividir en dos grupos o fases del proceso. i) Aquellos cometidos durante la colección de los datos, los cuales obedecen principalmente a errores durante la medición o el registro del dato en el formulario, uso incorrecto de los equipos de medición, interpretación errónea del manual de campo o a la selección errónea de una opción para codificar una variable. ii) Errores al digitalizar la información en la base de datos, que muestran valores faltantes (*i. e.* individuos sin diámetro o condición) o información errónea (*i. e.* individuos con altura mayor a 60 m o con categoría de tamaño errada), los cuales deben verificarse cotejando los formatos de campo.

Sea cual fuere el error detectado, se hace indispensable surtir una fase de limpieza de los datos, que implica la revisión y validación de toda la información de la serie a analizar. Comprende, entre otras actividades, identificar posibles inconsistencias que se hayan generado durante la fase de colección de datos en campo o en el momento de su digitalización detectar información faltante, comprobar que las variables a analizar cuenten con el tipo de información que se requiere y que no existan inconsistencias entre variables (*i. e.* individuos con altura del fuste mayor que la altura total).

Además de las fuentes de error, se pueden presentar casos de no respuesta (Olarte et al., 2021). La no respuesta se refiere a la ausencia de información en una o más variables. Existen dos tipos de no respuesta:

- **No respuesta parcial:** se presenta cuando no se puede completar una parte o porción del conglomerado.
- **No respuesta completa:** se presenta cuando no se puede llevar a cabo el levantamiento del conglomerado o cuando el equipo llega al conglomerado y ya no existe bosque.

En caso de no respuesta parcial, se utiliza el procedimiento estadístico de imputación para reemplazar los valores faltantes con un conjunto de valores plausibles. Estos valores se obtienen a partir de la información disponible en los demás

registros de la muestra o incluso de información existente en el universo de dato secundarios.

Para cada variable, se debe elegir la mejor opción para realizar la corrección o imputación de un dato faltante o erróneo. La opción seleccionada debe quedar debidamente documentada en la base de datos (indicando el cambio realizado, responsable, fecha y justificación). Considerando el alto número de registros a analizar (para la serie se componen de aproximadamente 8.576.330 datos, solamente para el formato de registro y medición de individuos), hace, de este, un proceso complejo que debe realizarse con precaución para garantizar la consistencia de los datos.

Las correcciones se realizan cuando se tiene la certeza de cuál es el verdadero valor que debería tomar la variable, pues como ya se mencionó se pueden presentar algunas inconsistencias en la digitación. Para el caso de las imputaciones, se tiene en cuenta la información disponible en el universo de estudio y/o también se cruza con información disponible en los demás registros. En la Tabla 3, se presentan algunos ejemplos de cómo realizar los ajustes de datos.



Tabla 3. Opciones para asignar (corregir) valores faltantes o identificados como erróneos en la base de datos del IFN

Tipo variable	Opciones corrección datos
Variables numéricas (e. g. diámetro, altura)	• Asignar el límite inferior de la categoría de tamaño a la que pertenece el individuo. • Asignar el valor promedio por conglomerado para la categoría de tamaño (y/o familia). • Emplear una regresión para predecir el valor faltante (e. g. regresión diámetro-altura). • Excluir la observación, subparcela o el conglomerado.
Variables categóricas (e. g. tamaño individuo, condición)	En la mayoría de los casos, hacer un chequeo cruzado de información permite identificar la mejor opción para la corrección. Por ejemplo: • Asignar la categoría de tamaño en función del diámetro (o altura en caso de los brinzales) del individuo. • Asignar la condición del individuo (vivo o muerto) en función de la información registrada en los campos de colección botánica y de penetración con el penetrómetro dinámico.

Fuente: Ideam y UNAL (2021).

Por último y a fin de agilizar los procesos de revisión y limpieza de bases de datos, por medio del programa R (R Core Team, 2021) se hace uso una serie de algoritmos, que permiten revisar, corregir o completar acertadamente la base de datos del IFN. En la Tabla 4, se observan los principales algoritmos desarrollados.

Tabla 4. Principales algoritmos desarrollados en R, para la revisión y depuración de la base de datos del IFN

Categoría de error	Descripción
Sin dato	Consta de revisar que no falten datos en todas aquellas variables que deben tener información para todos los individuos, según se indican en el manual del IFN: conglomerado, subparcela, tamaño individuo, ID individuo y condición. De igual forma, es necesario corroborar, en aquellas variables que deben tener información para todos los individuos excepto para los brinzales, lo siguiente: azimut, distancia, DAP, equipo, forma y daño del fuste.
Duplicado	Consiste en revisar si existen individuos repetidos, es decir, registros en los cuales se repite toda la información registrada en campo.
Códigos	Comprende la revisión de los códigos de las variables alfanuméricas. Por ello, consiste en identificar si los códigos incluidos en la base de datos corresponden a los indicados en el manual del IFN. Las variables para revisar durante este procedimiento son: número subparcela fustales (valores 1, 2, 3, 4 y 5), tamaño del individuo (valores FG, F, L y B), condición (MP, TM, TV, VC y VP), equipo 1 (medición del DAP, valores CD, FO y CA), equipo 2 (medición alturas, valores CL, HL, VT y VX), forma fuste (valores CIL, FA, INC, IRR y RT) y, finalmente, daño (valores DB, DM, EB, Q y SD).
Formato	Se basa en la revisión y asignación del formato requerido a cada variable. La revisión del formato de las variables incluidas en la base de datos permite, en primera instancia, identificar los valores que no corresponden a lo estipulado en el manual del IFN (e. g. datos no numéricos en el DAP o la altura de los individuos).
Azimut	Radica en revisar que los valores de azimut no tengan decimales o sean mayores que 359°.
Tallos múltiples	Versa en la revisión de los tallos múltiples, que consiste en buscar inconsistencias entre la información de las variables tallo único múltiple y número de fustes. Primero, se revisa si existen individuos identificados como múltiples y, además, si la información del número de fustes no es correcta (e. g. 0 o > 1). Posteriormente, se revisa si existen inconsistencias en individuos que se indican con tallo único.
Estimación diámetro	Dado que algunos individuos son medidos con calibrador (pie de rey) o forcípula, consiste en estimar el DAP promedio entre las dos mediciones registradas en campo.
Rangos	Se trata de evaluar que las variables DAP, la altura y la distancia desde el centro de la subparcela a cada individuo estén dentro de los rangos determinados en el manual del IFN, según su categoría de tamaño. Si existen individuos con estas variables fuera de los rangos establecidos, se genera una alerta que indica el número de individuos con valores incorrectos.

Fuente: Ideam y UNAL (2021).

3.2. Corrección de colección botánica

Uno de los aspectos más críticos en la organización de la base de datos del IFN está relacionado con la corrección y validación de las especies registradas en campo. A pesar de que para este proceso se realiza una contratación especializada con herbarios (la mayoría de ellos certificados), ya sea por inconsistencias de digitalización en la base de datos, incorrecta identificación del espécimen derivados de una inadecuada colecta en campo, individuos infértiles, pocas descripciones organolépticas, descripciones erróneas, falta de ejemplares muestreados, errores ortográficos, mala representación morfológica de los individuos o que no son coherentes con la determinación taxonómica, colección de hábitos incorrecta (lianas bejucos, entre otros), muestras de baja calidad u omisión de descripciones de localización en la colecta entre otros, se detectan fallas e impresiones que afectan directamente la evaluación de los datos derivados sobre todo en lo que tiene que ver la estimación del volumen y la biomasa aérea.

La revisión consiste en identificar especies con errores de escritura –sinónimos, actualizaciones de los nombres, entre otras– y, por medio de la función “correctTaxo” de la librería Biomass, se realiza la comparación del listado de especies de la base de datos con el listado en línea de la página de Taxonomic Name Resolution Service - TNRS. En la base de datos, se generan dos columnas nuevas que contienen los géneros y/o especies válidos.

Una vez finalice el primer proceso de revisión, la persona encargada de la validación de los datos taxonómicos debe corroborar los cambios sugeridos frente a otras plataformas empleadas en la estandarización de nomenclatura taxonómica como: The Botanical Information and Ecology Network, la Universidad de Arizona, el Missouri Botanical Garden, Nacional Science Foundation, entre otras, con el fin de determinar si es necesario cambiar el nombre de la especie y ajustarlo a su más reciente clasificación. Este resulta en uno de los procesos más dispendiosos durante todo el ejercicio de cálculo (Ideam y UNAL, 2021).



3.3. Post-estratificación

Teniendo en cuenta que el IFN, se diseñó bajo un esquema post-estratificado de muestreo aleatorio simple. Se hace necesario identificar, para cada conglomerado analizado en la serie 2015-2022, el estrato a que pertenece, así como la región natural en la que se ubica. Estos ajustes permiten calcular los pesos específicos de cada post-estrato, que corresponden a la proporción del área del país que ocupa cada post-estrato con relación al total nacional (ver Tabla 5). La post-estratificación es un caso particular de la metodología de calibración, a través de la cual se realiza una post-estratificación a dos vías: i) bosque – ii) no bosque y regiones naturales biogeográficas, de tal forma que las estimaciones sean consistentes con las áreas de ambos post-estratos.

Tabla 5. Superficie en hectáreas de bosque, no bosque y sin información para cada una de las regiones naturales de Colombia, según el mapa de bosques y no bosques del año 2022

Estrato	Amazonía	Andes	Caribe	Orinoquía	Pacífico
Bosque	38.911.688,68	11.249.721,14	1.617.412,66	2.069.311,96	5.437.409,96
No Bosque	6.946.429,59	17.880.300,43	13.837.740,24	14.763.293,13	1.282.856,64
Sin Información	52,52	66.553,61	69,63	12,46	1.702,26

Fuente: elaboración propia a partir de datos suministrados por el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono en el 2022.

Posterior al levantamiento de los conglomerados por la brigadista, se genera una revisión de la post-estratificación con base en los formatos de campo. Para ello, solo se consideran los conglomerados que presentan cambios de cobertura con base en la categorización que registra el SMBYC, lo cual se contrasta con el estrato del mapa de bosques y no bosques del 2018 (Olarte et al., 2021), al igual que con los conglomerados que quedaron en zonas de transición del borde del bosque.

El ejercicio de revisión de coberturas y reasignación de estas por cada conglomerado se realizó siguiendo el siguiente protocolo:

1. Se revisó para cada conglomerado el formato F2 (subparcelas), para registrar la presencia de bosques de tierra firme y bosque inundables. Se corroboró el porcentaje de participación de cada cobertura en cada subparcela.
2. Se determinó el umbral de área basal para cada región biogeográfica, en función del formato F3 (Registro y Medición de Individuos). En aquellos casos en los cuales el área basal no superará el 30 % de la superficie ocupada por la cobertura forestal a nivel de hectárea (definición de bosque adoptada por el Marco Rector del IFN), se registra esa subparcela como no bosque. De igual manera, se revisó el número de individuos y el tamaño (L, F y FG), para corroborar que el dato del área basal fuese consistente.
3. En los casos que pasaron de no bosque a bosque, según los datos de campo del IFN, se revisó en el formato F4 (colección botánica) que no

correspondiese a especies de plantaciones forestales o cultivares.

4. El estrato bosque o no bosque del conglomerado es en función de la mayor cantidad de subparcelas que pertenezcan al mismo estrato; no se asigna ningún peso cuando en un mismo conglomerado se evidencian dos tipos de estratos (*i.e.* claro, bordes, entre otros).
5. El estrato de la cobertura boscosa es único y se asigna a nivel de conglomerado, que es la unidad muestral. A partir de lo anterior, se define cada conglomerado como bosque o no bosque, solamente.

3.4. Estimadores

En cuanto a las características de interés, estas corresponden a los aspectos relacionados con las variables, categorías de análisis e indicadores, cuya información se recogerá a través de la muestra.

En este contexto, cabe resaltar que las características poblacionales de interés o parámetros, desde la perspectiva muestral, son de tres tipos: totales, razones e indicadores especiales.

Para el caso de los totales, estos se definen como la suma sobre el universo de la variable en estudio y_k , que corresponde al valor de y para la k -ésima unidad de observación:

$$t_y = \sum_U y_k$$

Así, desde un punto de vista práctico, el parámetro que se estudia con base en encuestas poblacionales multipropósito a través de métodos probabilísticos, en la gran mayoría de los casos, es de tipo *razón*.

Una *razón* se define como el cociente de dos totales. Un caso particular de una razón son las proporciones o porcentajes (también, el promedio aritmético) que se definen como el cociente entre dos frecuencias. Esto quiere decir que, en una investigación en la que para cada elemento se estudian dos características Y y Z y se tienen los totales t_y y t_z , entonces la razón se define como:

$$R = \frac{t_y}{t_z} = \frac{\sum_U y_k}{\sum_U z_k}$$

Como se observará más adelante, para propósitos del cálculo del tamaño de muestra, el parámetro trazador será de tipo proporción.

Bajo un diseño MASC se tiene que el total poblacional es:

$$t_y = \sum_{k \in U} y_k = \sum_{i=1}^{N_I} \sum_{k \in U} y_k = \sum_{i=1}^{N_I} t_{yi}$$

Donde N_I es el total de conglomerados del universo y y_k la variable de interés. A su vez, el promedio poblacional viene dado por:

$$\bar{y}_U = \frac{\sum_{k \in U} y_k}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_I} \sum_{k \in U} y_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_I} N_i \bar{y}_i$$

Donde,

$$\bar{y}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{k \in U} y_k$$

Es el promedio de la variable y_i en el i -ésimo conglomerado y N_i es el total de elementos por conglomerado.

Así, el total poblacional estimado, su varianza y su estimador de varianza son respectivamente:

$$\hat{t}_{y,\pi} = \frac{N_I}{n_I} \sum_{i=1}^{n_I} t_{yi}$$

$$Var_{MAC}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N_I^2}{n_I} \left(1 - \frac{n_I}{N_I}\right) S_{t_y U_I}^2$$

$$\widehat{Var}_{MAC}(\hat{t}_{y,\pi}) = \frac{N_I^2}{n_I} \left(1 - \frac{n_I}{N_I}\right) S_{t_y \sigma_I}^2$$

Donde,

$$S_{t_y U_I}^2 = \frac{1}{N_I - 1} \sum_{i \in U_I} (t_{yi} - \bar{t}_{U_I})^2$$

con

$$\bar{t}_{U_I} = \frac{\sum_{i=1}^{N_I} t_{yi}}{N_I}$$

$$\text{y } S_{t_y, S_I}^2$$

Y donde N_I es el tamaño de muestra de conglomerados

Para una razón, se tiene que:

$$uk = (y_k - \hat{R}z_k) \frac{1}{\hat{t}_{z,\pi}}$$

En ese caso, la varianza estimada de la razón estimada es:

$$\hat{V}_{MASC}(\hat{R}) = \frac{N_I^2}{n_I} \left(1 - \frac{n_I}{N_I}\right) S_{t_{usI}}^2$$

A partir de la varianza estimada para el estimador de razón, se obtiene el intervalo de confianza del 95 % para un dominio d , se tiene que $\hat{R}_d$:

$$IC_{\hat{R}_d} = \hat{R}_d \pm \sqrt{V(\hat{R}_d)} \times t_{(0.05, n-1)}$$

Finalmente, el error de muestreo (EM) para el atributo de interés se estima mediante la ecuación:

$$EM (\%) = 100 \left(\frac{\sqrt{V(\hat{R}_d)}}{\hat{R}_d} \right) t_{(0.05, n-1)}$$

3.5. Factores de expansión

Para un diseño MASCS, la probabilidad de inclusión se define como:

$$\pi_I = \frac{n_I}{N_I}$$

En consecuencia, el factor de expansión es:

$$Fexp = \frac{N_I}{n_I}$$

Donde N_I es el total de conglomerados teóricos del país y n_I el tamaño de muestra de conglomerados, de acuerdo con el marco y muestreo de áreas definido se establece que:

$$\begin{aligned} NI &= \frac{\text{Área del país}}{\text{Área del conglomerado}} \\ &= \frac{114.064.555 \text{ ha}}{0,3535 \text{ ha}} \\ &= 322.672.008 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que el tamaño de muestra de la serie 2015-2022 se basa en 953 conglomerados, entonces:

$$Fexp = \frac{N_I}{n_I} = \frac{322.672.008}{953} = 338.585$$

3.6. Calibración

Como se mencionó en la sección 1.3 de este documento, se plantea, para el IFN, una post-estratificación a dos vías, es decir, teniendo en cuenta dos variables, en

este caso las variables son la cobertura bosque-no bosque y la región natural (ver Tabla 5), buscando que las áreas estimadas sean consistentes con las áreas totales de dichas variables.

La post-estratificación a dos vías es un caso particular de los estimadores de calibración. En consecuencia, se considera como vector de información auxiliar (variables cobertura y región):

$$\begin{aligned} X &= (X^*, \hat{X}^0), \text{ donde } X \\ &= \sum_U x_k^* \text{ y } \hat{X} \\ &= \sum_s \frac{x_k^0}{\pi_k} \end{aligned}$$

Como pesos finales, se consideran:

$$w_{2Bk} = w_k^0 v_k$$

Con $v_k = 1 + \lambda_r' x_k^*$, donde λ_r'

$$\begin{aligned} &= \left(\sum_U x_k^* - \sum_r w_k^0 x_k^* \right)' \\ &\quad \left(\sum_r w_k^0 x_k^* (x_k^*)' \right)^{-1} \end{aligned}$$

En esta expresión, se tiene:

$$w_k^0 = d_k v_k^0, v_k^0 = 1 + (\lambda_r^0)' x_k^0$$

$$\begin{aligned} \text{Con } (\lambda_r^0)' &= \left(\sum_s d_k x_k^0 - \sum_r d_k x_k^0 \right)' \\ &\quad \left(\sum_r d_k x_k^0 (x_k^0)' \right)^{-1} \end{aligned}$$

La estimación del total calibrado se calcula como:

$$\hat{t}_{y,calib} = \sum_{SI} w_{2Bk} t y_i$$

Para implementar los estimadores de calibración, se utilizará la función calibrate del paquete Survey de R.



© Archivo fotográfico del IFN - Ideam - Medición de individuos (2016).

3.7. Cálculos dasométricos, de suelos y detritos de madera

A cada uno de los individuos registrados en los conglomerados se les midió el diámetro normal a 1,3 m de su altura. En caso de que el punto de observación de la medida (POM) se hubiese tomado a otra altura en presencia de algún tipo de irregularidad se estima el diámetro normal a través del factor de reducción diamétrica (FRD), por medio del cual se cuantifica la tasa de cambio del diámetro en función de la altura (Rojas y Murillo, 2000), descrito a continuación:

$$FRD = \frac{d}{H - H_d}$$

$$dap = d + (H_d - 1,3) \cdot FRD$$

De donde: *FRD* es el factor de reducción diamétrica, *DAP* es el diámetro normal a 1,30 m, *d* es el diámetro del POM en cm, *H* es la altura total en m y *H_d* es la altura a la cual se midió el POM en m.

A través del FRD, se corrige el diámetro normal cuando el diámetro se toma a una altura diferente de 1,30 m, según se registra en el campo el POM. Los diámetros tomados por encima del 1,30 m son menores que el diámetro normal y los diámetros tomados por debajo del 1,30 m son mayores que el diámetro normal. Con base en lo anterior, el uso del FRD evita que se presenten subvaloraciones o sobrevaloraciones del área basal al corregir el diámetro a su correspondiente diámetro normal.

En presencia de datos dendrométricos faltantes, tales como la densidad de la madera, el diámetro normal o la altura, se emplea un proceso de reemplazo con los datos disponibles, lo cual es común en inventarios de gran volumen de información obtenidos con diferentes operadores en campo. Si bien existen varios procedimientos para enfrentar los datos faltantes (*missing values*), a partir del análisis de datos completos (*listwise o case deletion LD*), datos disponibles (*pairwise deletion*), el método de medias o el *hot-deck*, en el presente estudio se empleó tanto para la imputación de densidad de la madera el método de las medias a partir de la base de datos global (Chave et al., 2009) como para los casos del diámetro normal y de la altura total a través del modelo de Weibull.

La imputación de la altura se lleva a cabo en los registros que no poseen el dato del registro de la altura o en aquellos cuyo índice de esbeltez (H/dap) es menor a 0,1 y mayor de 3 (individuos de gran diámetro con una altura mínima, o viceversa, árboles con un diámetro mínimo con alturas de gran porte, respectivamente), para lo cual se emplea el modelo de Weibull, cuyos parámetros se diferencian por región y hábito de crecimiento:

$$H = a \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{dap}{b}\right)^c}\right)$$

De donde: *H* es la altura total en m, *DAP* es el diámetro normal a la altura de 1,30 m en cm y *a-b-c* son los parámetros del modelo de Weibull.

El ajuste de los modelos se realizó de forma independiente para cada una de las cinco (5) regiones naturales del país, para lo cual se utilizó el modelo asintótico de Weibull, para árboles, para palmas y helechos arbóreos (ver Tabla 6).

Tabla 6. Parámetros del modelo de Weibull, por región y hábito de crecimiento

Donde: a - b - c son los parámetros del modelo de Weibull y RMSE es la raíz del error cuadrático medio.

Región	Hábito	a	b	c	RMSE
Amazonía	Árbol	34,7056	25,6204	0,8172	4,75
Andes	Árbol	25,6670	21,5046	0,9005	6,57
Caribe	Árbol	29,5603	25,7037	1,0393	7,85
Orinoquía	Árbol	27,3209	37,5610	0,6657	3,21
Pacífico	Árbol	31,0021	14,0900	1,4057	10,03
Helecho arbóreo o palma		13,7368	8,0571	1,7709	6,23

Adicionalmente, a cada individuo se le tomó una muestra botánica, para ser determinada y homologada por la Red de Herbarios de Colombia.

La validez de los nombres científicos se contrastó en Taxonomic Name Resolution Service v5.0 (Boyle et al., 2016), cuya plataforma corrige, estandariza y actualiza los nombres científicos, a través de bases de datos del Missouri Botanical Gardens Tropicos database - Tropicos, The Plant List (versión 1.1) - TPL y de la USDA Plants (Fecha de consulta de bases de datos: 2023-11-15).

En el caso de las especies no reportadas en la base de datos del herbario del Ideam, se corrobora su hábito de crecimiento en el Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia (Bernal et al., 2019).

Se imputa la densidad básica de la madera, a partir de la base de datos global de densidad de madera (Chave et al., 2009). Los registros se asignan en función de su nombre científico, es decir, género y especie. En el caso de reportarse varias densidades para una misma especie, se consigna el valor promediado. En ausencia de la determinación a nivel de especie, se realiza una imputación del valor promedio de la densidad de la categoría taxonómica superior, es decir, género, y en su ausencia, el valor promedio de la densidad para la familia. Cuando los registros no tienen su equivalente en la base de datos global de densidad de la madera (bien sea por ausencia de clasificación taxonómica o ausencia del nombre en la base de datos), la densidad se imputa a partir de la densidad media por conglomerado para cada tamaño (L, F o FG), y en su ausencia, por región, estrato y clasificación diamétrica (L, F o FG).

La estimación de la biomasa aérea de los árboles se obtuvo a través del modelo de Chave et al. (2014)

$$AGB = 0,0673 \cdot (dap^2 \cdot H \cdot \rho)^{0,976}$$

De donde: AGB es la biomasa aérea en kg, DAP es el diámetro normal a 1,30 m en cm, H es la altura total en m y ρ es la densidad de la madera en $g\ cm^{-3}$. Rango de aplicación del modelo, individuos entre 5 y 212 cm de DAP .

Dado que el rango de aplicabilidad de dicha ecuación alométrica es de 5 a 212 cm de diámetro, los individuos con diámetro menor a 5 cm fueron excluidos de los cálculos, mientras que a los árboles que excedieron el diámetro máximo empleado para ajustar la ecuación se les asignó dicho valor (*i. e.* 212 cm), para estimar su biomasa aérea.

De igual manera se están registrando individuos con otros hábitos de crecimiento, tales como palmas y helechos arbóreos, para los cuales se hace uso de los modelos de biomasa para palmas de Sierra et al. (2007) y helechos arbóreos, a partir de Weaver (2000), presentados a continuación:

Palmas

$$AGB = e^{0.36+1.218 \cdot \ln(H)}$$

Helechos arbóreos

$$AGB = 3,82 H - 3,62$$

De donde: AGB es la biomasa aérea en kg y H es la altura total en m.

Una vez se realizaron estimaciones agregadas por conglomerado, los valores fueron extrapolados a hectárea (Mg ha^{-1}). Con este último valor, se estimó la biomasa subterránea (raíces), a partir del modelo de Cairns et al. (1997):

$$BRG = e^{-1,085+0,9256 \cdot \ln(AGB)}$$

De donde: *BRG* es la biomasa subterránea y *AGB* es la biomasa aérea, en kg.

Finalmente, se estimó el carbono total (CT), entendiendo la biomasa total como la suma de la biomasa aérea (AGB) y la biomasa subterránea (BRG), y se obtuvo mediante la fórmula:

$$CT = 0,47 * (AGB + BRG)$$

Los datos de carbono del suelo provienen de la recolección de cinco muestras por conglomerado, una en cada subparcela. Cada muestra consiste aproximadamente de 400 g de suelo, extraídos a una profundidad entre 0-30 cm. Adicionalmente, en cada subparcela se tomó una muestra de suelo para estimar la densidad aparente del suelo.

Para estimar los contenidos de carbono orgánico en el suelo, primero se calculó la densidad aparente (g cm^{-3}), este valor representa la densidad promedio de todos los materiales presentes en suelo.

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Peso de masa seca de suelo (g)}}{\text{Volumen de suelo (cm}^3\text{)}}$$

El volumen de suelo se obtiene como:

$$\text{Volumen} = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

De donde: *r* es el radio del cilindro utilizado para tomar la muestra de suelo en cm; y *h* es la longitud del cilindro en cm, con el cual se toma la muestra de la densidad aparente.

Los contenidos de carbono en los suelos (COS) se estimaron a partir de la relación entre los resultados de la concentración de carbono en las muestras de suelo (obtenidas en el laboratorio), la densidad aparente del suelo y la profundidad hasta la cual se tomó la muestra. Con esto, se obtuvo la cantidad de COS en kg ha^{-1} o, al dividirse este valor por 1.000, la cantidad de Mg ha^{-1} de COS.

$$\text{COS} = \frac{\% \text{ Carbono}}{100} \cdot \text{Densidad aparente} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot \text{Profundidad(m)} \cdot 10.000 \left(\frac{\text{m}^2}{\text{ha}} \right)$$





© Archivo fotográfico del IFN - Ideam - El Retorno (2021)

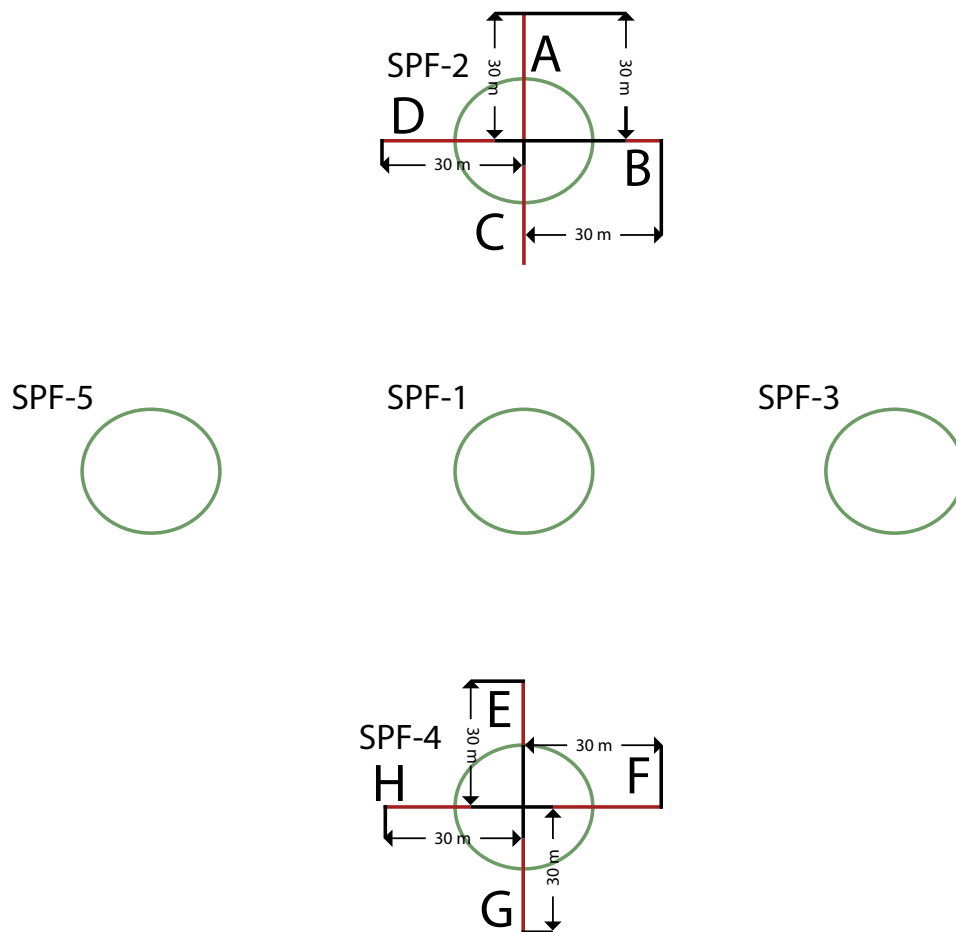
La estrategia de muestreo de detritos de madera se ha diseñado en concordancia con el marco geoestadístico del Inventario Forestal Nacional (IFN), que emplea, como unidad mínima de muestreo, cada conglomerado está compuesto por cinco (5) subparcelas forestales anidadas a un centroide. Dentro de estas 5 subparcelas, se realiza el muestreo únicamente en las subparcelas denominadas SPF2 y SPF4, ubicadas en el norte y sur del conglomerado; en estas se establecen transectos de 30 metros de longitud, cuatro (4) por cada subparcela, desde el centro hacia los cuatro puntos cardinales. A los transectos se les asignan las letras A, B, C, D, E, F, G y H (Ideam, 2021).

Dentro de este enfoque de muestreo exhaustivo, se realiza la evaluación detallada de diversos tipos de detritos. Se abarca desde los fragmentos más pequeños de madera, clasificados como detritos finos

de madera (DFM), hasta los trozos más voluminosos, denominados detritos gruesos de madera (DGM).

El muestreo de detritos de madera (DM) permite estimar la necromasa contenida en árboles muertos en pie (MP), tocones muertos (TM) y detritos de madera sobre el suelo (DMS), que consisten en árboles y ramas caídas. Los MP y TM son medidos al interior de cada uno de los conglomerados. En el caso de los DMS, representados por las categorías de detritos finos (DFM; diámetro < 20 cm) y gruesos (DGM; diámetro ≥ 20 cm), el muestreo se realizó en las subparcelas 2 y 4 de cada conglomerado (ver Figura 3). Para ello, en cada una de las subparcelas se establecieron cuatro (4) transectos de 30 m de largo cada uno (equivalentes a dos de 60 m cada uno), divididos en secciones de 10 m. Para la estimación de los detritos en campo, se consideró la metodología de Larjavaara y Muller (2011).

Figura 3. Muestreo de transectos lineales para detritos de madera en el IFN



Fuente: Ideam (2018).

El diseño de muestreo de los DGM sigue un esquema detallado de subparcelas previamente mencionadas. Cada uno de los ocho (8) transectos se dividen en tres (3) secciones de 10 metros cada una (ver Figura 4). Estas secciones se identifican como sigue: la sección I abarca desde 0 hasta 10 metros, la sección II va desde 10 hasta 20 metros y, finalmente, la sección III

comprende de 20 a 30 metros, siempre partiendo desde el centro de la subparcela hacia afuera. Para llevar a cabo las mediciones de los DFM, se toma el último metro de cada sección y se registra la distancia horizontal a la cual se encuentra la pieza con relación al centro de la parcela (Ideam, 2021).

Figura 4. Esquema de transecto para muestreo de detritos en una subparcela

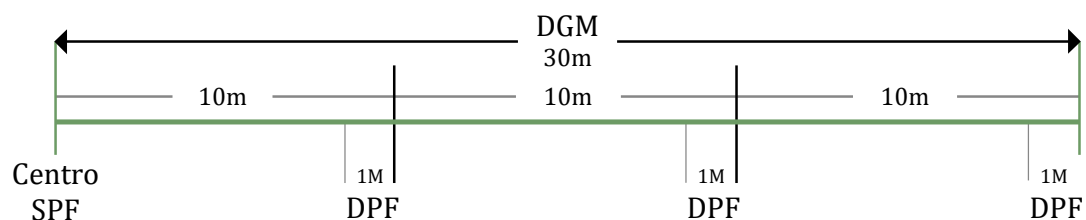


Tabla 7. Variables para evaluar en cada pieza de detritos caídos de madera

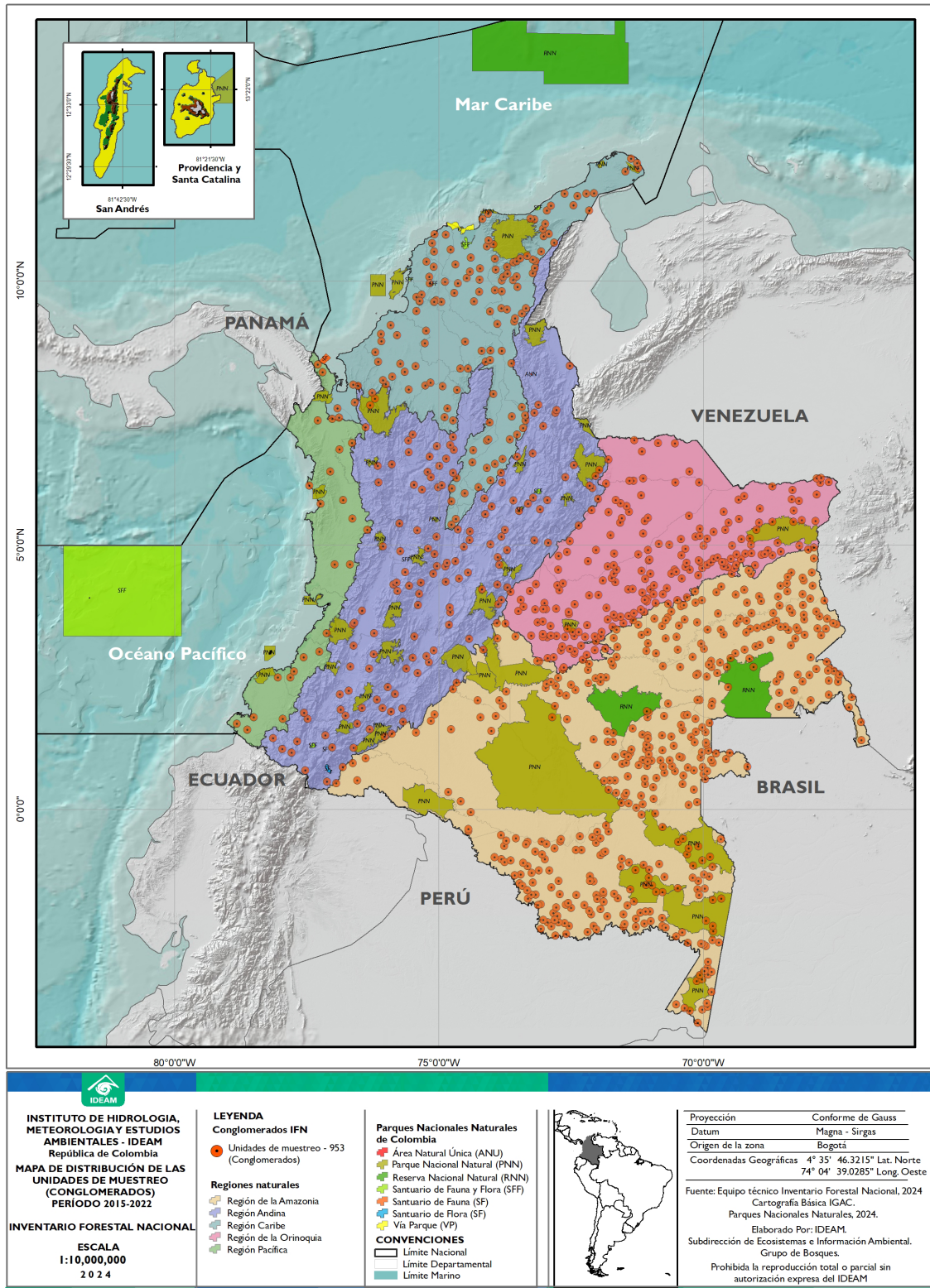
Tamaño detrito	Sub parcela	Transecto	Distancia (m)	Diámetro (cm)	Azimut	Inclinación	Penetración	Espesor	Peso rodaja	Peso fresco muestra
DFM	2 y 4	A-D E-H	9 - 10 19 - 20 29 - 30	2,00 - 19,9	0 - 359°	Con relación a la horizontal				X
DGM	2 y 4	A-D E-H	0 - 30	> 20	0 - 359°	Con relación a la horizontal	X	X	X	X

Tabla 8. Términos y cálculos realizados en las muestras de detritos caídos

Variables	Función	Referencia
Volumen total por individuo (m ³)	$Vi = \frac{\pi^2}{8L} \sum \frac{d^2}{\cos\sigma}$ Donde, <i>Vi</i> = volumen (m³) <i>L</i> = es la longitud (m) del transecto <i>d</i> = diámetro de la pieza de detrito <i>σ</i> = donde es el ángulo de inclinación de la pieza (en radianes)	Harmon et al. (1986)
Sumatoria de la masa de cada pieza de detrito caído en la unidad mínima de muestro (Conglomerado)	$M = \sum Vi * \rho i$ Donde, <i>M</i> = masa detritos de madera (kg) <i>Vi</i> = volumen del detrito (m³) <i>ρi</i> = densidad de la madera del detrito (kg m⁻³)	Yepes et al. (2011)

4. Resultados

Figura 5. Ubicación geográfica de los 953 conglomerados implementados en la fase 2015-2022 del IFN



Bajo la metodología explicada en el capítulo 2 de este documento y tomando como referencia la base de datos del IFN analizada para el período 2015-2022, que contiene un total de 953 conglomerados, y en los cuales se registraron un total de 61.995 tallos pertenecientes a 58.682 individuos arbóreos (árboles, palmas y helechos arbóreos) para cinco regiones biogeográficas analizadas: Amazonía, Andes, Caribe, Pacífico y Orinoquía (ver Figura 5), se presentan

los resultados de estimación por región y estrato de cobertura boscosa (B: bosque, NB: No bosque, ND: No disponible). Se elaboraron las estimaciones de tal forma que sean consistentes, para que la suma de los desagregados resulte en el total nacional. Las estimaciones fueron calibradas para obtener las áreas nacionales por región y bosque-no bosque y, con ello, se consignan de tal forma que el factor de expansión responda al tamaño de la parcela.

4.1. Contenidos de biomasa aérea (AGB), subterránea (BRG) y total en los ecosistemas boscosos de Colombia

Tabla 9. Cantidad de carbono en la biomasa aérea (AGB), subterránea (BRG) y total calculada para individuos con un DAP ≥ 5 cm, por región y estrato

B: bosque, SE: desviación estándar, CVE: coeficiente de variación.

Región	Estrato	Biomasa aérea (Mg ha ⁻¹)	SE	CVE	Biomasa subterránea (Mg ha ⁻¹)	SE	CVE	Biomasa total (Mg ha ⁻¹)	SE	CVE
Amazonía	B	246,52	3,93	1,60	51,01	0,75	1,47	297,53	4,68	1,57
Andes	B	86,38	7,40	8,56	19,01	1,54	8,11	105,39	8,93	8,48
Caribe	B	82,42	9,75	11,83	17,60	1,89	10,74	100,02	11,63	11,63
Orinoquía	B	83,07	4,80	5,77	18,51	1,00	5,38	101,59	5,79	5,70
Pacífico	B	226,86	35,95	15,85	45,98	6,54	14,22	272,85	42,46	15,56

4.2. Contenidos de carbono almacenado en la biomasa aérea (AGB), subterránea (BRG) y total en los ecosistemas boscosos de Colombia

Tabla 10. Cantidad de carbono en la biomasa aérea (AGB), subterránea (BRG) y total calculada para individuos con un DAP ≥ 5 cm, por región y estrato

B: bosque, SE: desviación estándar, CVE: coeficiente de variación.

Región	Estrato	C AGB (Mg ha ⁻¹)	SE	CVE	C BRG (Mg ha ⁻¹)	SE	CVE	C AGB+BRG (Mg ha ⁻¹)	SE	CVE
Amazonía	B	115,87	1,85	1,60	23,97	0,35	1,47	139,84	2,20	1,57
Andes	B	40,60	3,48	8,56	8,93	0,72	8,11	49,53	4,20	8,48
Caribe	B	38,74	4,58	11,83	8,27	0,89	10,74	47,01	5,47	11,63
Orinoquía	B	39,04	2,25	5,77	8,70	0,47	5,38	47,75	2,72	5,70
Pacífico	B	106,62	16,90	15,85	21,61	3,07	14,22	128,24	19,96	15,56

4.3. Biomasa en árboles muertos en pie (MP), tocones muertos (TM), detritos finos de madera (DFM) y detritos gruesos de madera (DGM) en bosques de Colombia

Tabla 11. Cantidad de biomasa en necromasa (MP y TM, DFM y DGM) por región y estrato

B: bosque, SE: desviación estándar, CVE: coeficiente de variación.

Región	Estrato	MP y TM (Mg ha ⁻¹)	SE	CVE	DFM (Mg ha ⁻¹)	SE	CVE	DGM (Mg ha ⁻¹)	SE	CVE
Amazonía	B	9,18	0,44	4,79	5,49	0,38	6,94	6,44	0,51	7,96
Andes	B	3,23	0,77	23,88	2,32	0,61	26,13	0,82	0,40	48,25
Caribe	B	2,53	0,60	23,80	1,81	0,60	33,33	1,04	0,41	39,37
Orinoquía	B	2,55	0,36	14,02	3,51	0,75	21,34	3,46	0,72	20,88
Pacífico	B	4,68	1,88	40,18	0,13	0,05	36,53	2,51	0,77	30,75

4.4. Carbono acumulado en árboles muertos en pie (MP), tocones muertos (TM), detritos finos de madera (DFM) y detritos gruesos de madera (DGM) en bosques de Colombia

Tabla 12. Cantidad de carbono acumulado en necromasa (MP y TM, DFM y DGM) por región y estrato

B: bosque, SE: desviación estándar, CVE: coeficiente de variación.

Región	Estrato	C MP y TM (Mg ha ⁻¹)	SE	CVE	C DFM (Mg ha ⁻¹)	SE	CVE	C DGM (Mg ha ⁻¹)	SE	CVE
Amazonía	B	4,32	0,21	4,79	2,58	0,18	6,94	3,03	0,24	7,96
Andes	B	1,52	0,36	23,88	1,09	0,28	26,13	0,39	0,19	48,25
Caribe	B	1,19	0,28	23,80	0,85	0,28	33,33	0,49	0,19	39,37
Orinoquía	B	1,20	0,17	14,02	1,65	0,35	21,34	1,63	0,34	20,88
Pacífico	B	2,20	0,88	40,18	0,06	0,02	36,53	1,18	0,36	30,75

4.5. Carbono orgánico del suelo (COS) en los ecosistemas boscosos de Colombia

Tabla 13. Cantidad de carbono orgánico acumulado en el suelo (COS) por región y estrato

B: bosque, SE: desviación estándar, CVE: coeficiente de variación.

Región	Estrato	COS (Mg ha ⁻¹)	SE	CVE
Amazonía	B	48,35	2,64	5,46
Andes	B	94,17	10,60	11,26
Caribe	B	42,17	5,14	12,19
Orinoquía	B	34,73	2,99	8,62
Pacífico	B	88,20	23,55	26,71

5. Consideraciones

- Considerando el periodo de referencia del IFN que es de 7 a 10 años, es importante recalcar que la recolección de los datos usados para las estimaciones se realiza durante este periodo de referencia, lo que quiere decir que, a medida que se implementa la muestra estos datos, irán siendo actualizados. Lo anterior implica que los cálculos realizados, incluidos aquellos que se presentan en este informe, se encuentren sujetos a variaciones. Esto quiere decir que los resultados presentados van a presentar variaciones con respecto a los presentados anteriormente. Sin embargo, los resultados, una vez que se termine toda la implementación y centralización de los datos, no presentarán cambios.
- Los cálculos presentados en este documento son el resultado de un primer ejercicio nacional de consolidación y análisis de los levantamientos de conglomerados realizados en el primer ciclo de implementación del Inventario Forestal Nacional de Colombia, por lo que constituyen un hito significativo hacia el avance del conocimiento de los bosques naturales.
- Este ejercicio marca un punto de partida revelador en el establecimiento de parcelas de muestreo de bosques naturales a nivel nacional, pues combina el esfuerzo logístico y técnico de varias instituciones. En consecuencia, se obtiene un set de datos robusto, que se sustenta en un proceso estandarizado de control de calidad y validación.
- La centralización de los datos está actualmente en curso, por lo que se abre un espacio para el perfeccionamiento y la mejora de la información recopilada. Por lo tanto, a medida que el proceso de centralización avance hacia su etapa final es razonable anticipar que los datos experimentarán un refinamiento gradual, lo que contribuirá a una visión más precisa y robusta de las estimaciones de carbono, asociadas a los bosques naturales a nivel nacional.
- Las estimaciones que se realizaron fueron promedios, totales y porcentajes. Todas las estimaciones se ajustaron usando los factores de expansión. Cada estimación se pudo calcular para cada uno de los estratos definidos en la post-estratificación. Las variables y sus estimaciones se presentan con

los correspondientes errores estándar (SE) y coeficientes de variación (CVE).

- El error muestral, en términos del coeficiente de variación, es la precisión de las estimaciones de los parámetros. El nivel de confianza es la medida de la probabilidad de que un intervalo de confianza contenga el valor real del parámetro poblacional que se está estimando. Estos dos parámetros son fijados por los investigadores para el cálculo del tamaño de muestra; en la mayoría de las investigaciones, entre el 1 y el 10 %, mientras que para el error muestral, en este caso, es del 5 %, y el nivel de confianza es del 95 % de probabilidad, es decir, $z = 1,96$.

6. Referencias

- Bernal, R., Gradstein, S., & M. Celis, M. (2019). *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia*. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Boyle, B., Hopkins, N., Lu, Z., Garay, J., Mozzherin, D., Rees, T., Matasci, N., Narro, M., Piel, W., McKay, S., Lowry, S., Freeland, C., Peet, R. K., y Enquist, B. (2016). The taxonomic name resolution service: an online tool for automated standardization of plant names. *BMC Bioinformatics*, 14(1)(16). <https://doi.org/10.1186/1471-2105-14-16>
- Cairns, M., Brown, S., Helmer, E., y Baumgardner, G. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s004420050201>
- Chave, J., Coomes, D., Jansen, S., Lewis, S., Swenson, N., y Zanne, A. (2009). Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology letters*, 12(4), 351-366. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x>
- Chave, J., Réjou, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M., Delitti, W., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P., y Goodman, R. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.

- FAO. (2021). *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2020*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma.
- Harmon, M., Franklin, J., Swanson, F., Sollins, P., Gregory, S., Lattin, J., Anderson, N., Cline, S., Aumen, N., Sedell, J., Lienkaemper, G.K., Cromack, K. y Cummins, K.W. (1986). Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems. *Advances in ecological research*, 15, 133-302.
- Ideam. (2018). *Manual de Campo Inventario Forestal Nacional Colombia, Versión 4.0 Colombia*, Bogotá, 2020. 160 páginas. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.
- _____. (2021). *Manual de Campo Inventario Forestal Nacional Colombia, Versión 5.2*. Adaptado de "IDEAM, 2018. Manual de Campo Inventario Forestal Nacional Colombia, Versión 4.0 Colombia, Bogotá, 2020. 160 páginas.". Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.
- Ideam y UNAL. (2021). *Validación de la base de datos del Inventario Forestal Nacional de Colombia para el periodo 2015-2019 (Documento sin publicar)*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Bogotá D.C.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2000). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC.
- Larjavaara, M., y Muller, H. (2011). *Cross-section mass: an improved basis for woody debris necromass inventory*. Silva Fennica. <https://doi.org/10.14214/sf.119>
- Olarte, C., Merchán, O., Linares, R., Quintero, F., León, R., Rodríguez, A., y Montealegre, J. (2021). *Marco rector para la implementación del Inventario Forestal Nacional*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.
- R Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. Published online 2020. *Supplemental Information References S*, 1, 371-378.
- Rojas, O., & Murillo, O. (2000). Calidad de las plantaciones de teca en la Península de Nicoya, Costa Rica. *Agronomía costarricense*, 24(2), 65-75.
- Sierra, C., del Valle, J., Orrego, S., Moreno, F., Harmon, M., Zapata, M., Colorado, G., Herrera, M., Lara, W., y Restrepo, D. (2007). Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia. *Forest Ecology and Management*, 243(2-3), 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.026>
- Weaver, P. (2000). Succession in the Elfin Woodland of the Luquillo Mountains of Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science*, 36(1/2), 1-9. <https://doi.org/10.2307/2388722>
- Yepes, A., Navarrete, D., Duque, A., Phillips, J., Cabrera, K., Álvarez, E., y Ordoñez, M. (2011). *Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa-carbono en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam.

Anexos

Anexo 1. Cálculo de los niveles de incertidumbre asociada al IFN²

Para el análisis de la incertidumbre asociada al IFN, es necesario considerar todos los aspectos que inciden en la calidad y precisión de los datos a lo largo de todo el proceso de implementación, es decir desde su planificación hasta las etapas operativas y posoperativas de campo. Por lo anterior, se construyó un programa de aseguramiento y control de calidad, que realiza, para cada etapa del proceso, la vigilancia, evaluación y monitoreo de las diferentes actividades del inventario forestal para asegurarse que continuamente se estén cumpliendo con un nivel deseado de calidad, a través de la atención a cada etapa del proceso.

Con el objetivo de realizar el control de calidad de la información y la evaluación de esta, el IFN cuenta con Información documentada en cada uno de sus procesos: manuales, guías, formatos, que han sido diseñados para asegurar que las actividades que se desarrollan se lleven a cabo siguiendo los estándares establecidos por el Ideam (Decreto 1655 de 2017) y el DANE (NTC PE 1000 de 2020), los cuales velan que las actividades realizadas se desarrollen, registren y documenten siempre de la misma manera, cuestión que minimiza el error asociado a la toma del dato.

Una vez obtenidos todos los datos de campo, se estructura la base de datos con los resultados de los levantamientos de campo. En este contexto, resulta necesario aplicar las reglas de limpieza y validación de datos, descritas en los primeros capítulos de este documento.

Atendiendo a lo anterior –y una vez completada, depurada y validada la base de datos–, con los resultados obtenidos de la estimación de los contenidos de biomasa y carbono para los diferentes

compartimientos, en conformidad con los parámetros del Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2000), se calcula la incertidumbre asociada al IFN, mediante el empleo de funciones de probabilidad.

Las funciones de probabilidad tienen la ventaja de representar, de manera compacta, la información estadística complementaria (i. e., media aritmética, varianza, asimetría y curtosis). Emplean, para ello, pruebas de bondad de ajuste a través de la estimación de la máxima verosimilitud (valor estimado del parámetro que tiene mayor probabilidad de ocurrencia y una mayor compatibilidad con los datos observados).

Se emplean, adicionalmente, criterios de compatibilidad, coherencia y transparencia. Seleccionando el menor número de funciones de probabilidad, con las siguientes salvedades: que se conozcan sus fórmulas matemáticas, el conjunto de parámetros requeridos, que las funciones estén bien documentadas y, que representen adecuadamente el comportamiento de los datos.

Sin embargo, existen procesos de variabilidad natural que afectan la incertidumbre de los datos (inherentes al proceso, los cuales se evalúan mediante análisis estadístico de datos representativos), como de igual manera, en la incertidumbre ocasionada durante el proceso de medición (sesgos personales, instrumentales, inexactitud de los valores, aproximaciones, entre otros), errores en el muestreo, incompletitud de datos (imputaciones), entre otros. En algunos casos, las limitantes de tiempo y espacio en la medición de cualquier variable física, que, de entrada, traen consigo cierta cantidad de incertidumbre aparejada.

² Los metadatos para sumideros forestales de carbono del IFN (biomasa aérea, biomasa subterránea, carbono orgánico del suelo y detritos de madera) por conglomerado, para el período 2015-2022, se encuentran disponibles en el siguiente enlace: <http://archivo.ideam.gov.co/documents/13257/0/2024-09+%28sep%29-24+NREF+IFN+2015-2022+ID+Anon+Enmasc+%282%29.xlsx>





1.1 Funciones de probabilidad empleadas

Para representar la distribución de probabilidad de las variables asociadas al IFN, se emplearon el modelo de distribución de Weibull (*i. e.* área basal, volumen, biomasa, detritos finos, detritos gruesos, árboles muertos en pie y tocones muertos) y el modelo de distribución beta (suelos).

Distribución Weibull: la función de distribución Weibull posee un parámetro de forma β , parámetro de escala α y parámetro de umbral θ . A partir de esta última se devuelve la probabilidad de que una observación sea menor o igual a la x especificada para la distribución de Weibull con los parámetros de forma, escala y umbral que se especificó. El Weibull de dos parámetros es similar al Weibull de tres parámetros, con umbral cero.

$$f(x) = \lambda \alpha (\lambda x)^{\alpha-1} e^{-(\lambda x)^\alpha}, x > 0$$

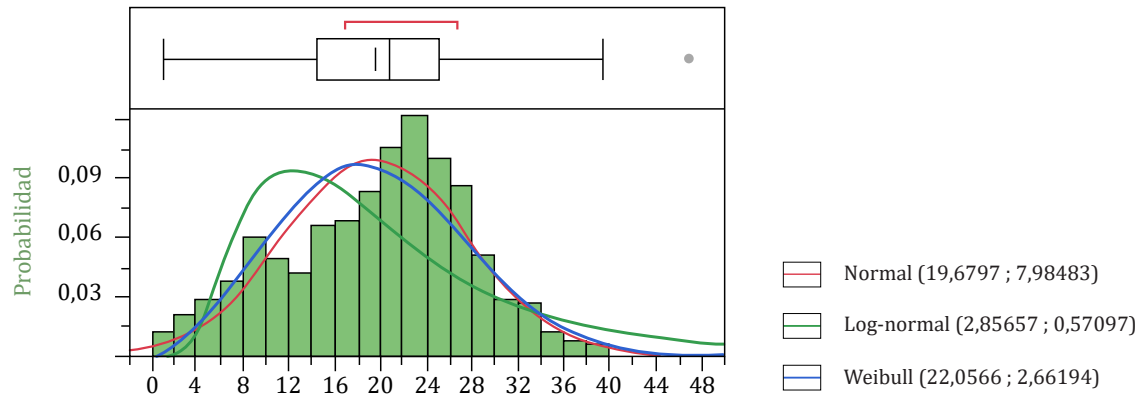
Distribución beta: La distribución beta, por su parte, tiene dos parámetros de forma: $\alpha > 0$ y $\beta > 0$. Un parámetro de umbral θ y un parámetro de escala σ son argumentos adicionales, donde $\theta \leq x \leq \theta + \sigma$. El valor predeterminado para θ es 0. El valor predeterminado para σ es 1.

$$f(x; \alpha, \beta) = \text{constante} \cdot x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}}{\int_0^1 u^{\alpha-1} (1-u)^{\beta-1} du} \\ &= \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \\ &= \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \end{aligned}$$

A continuación, se presentarán las incertidumbres estimadas para cada uno de los compartimientos analizados.

A. Incertidumbre en área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)



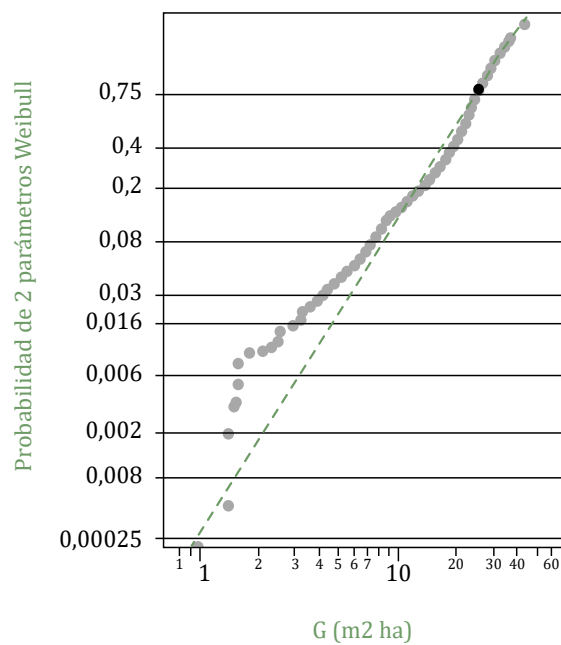
Ajuste de 2 parámetros Weibull

Estimaciones de parámetros

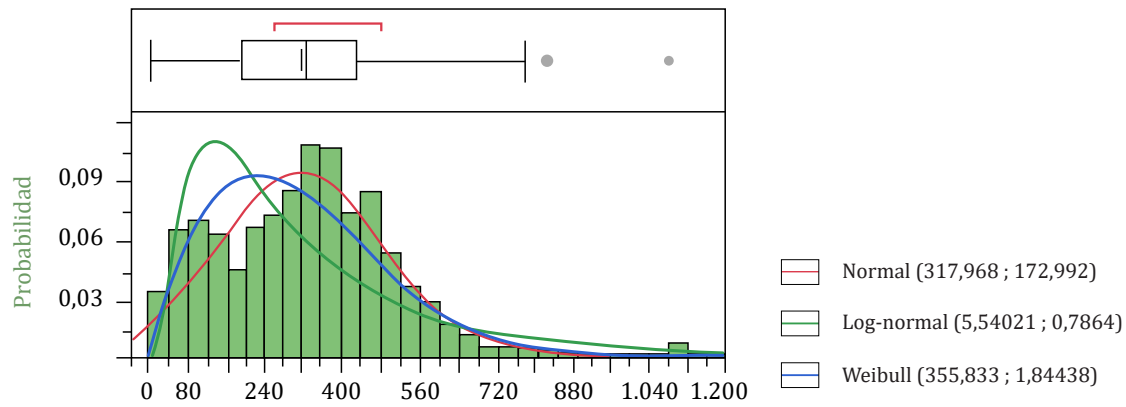
Tipo	Párametro	Estimación	Extremo inferior del IC al 95 %	Extremo superior del IC al 95 %
Escala	α	22,056587	22,05528	22,057893
Forma	β	2,6619367	2,6616074	2,662266

$-2\log(\text{verosimilitud}) = 1.183.703.318,11639$

Gráfico de diagnóstico



B. Incertidumbre en volumen ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$)



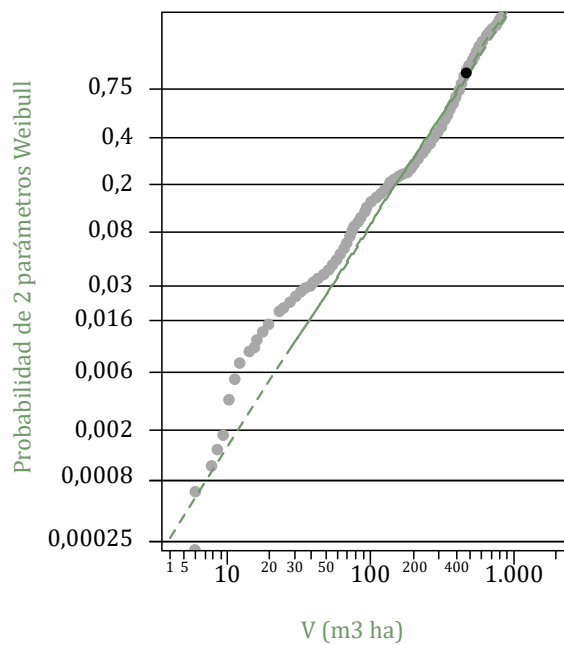
Ajuste de 2 parámetros Weibull

Estimaciones de parámetros

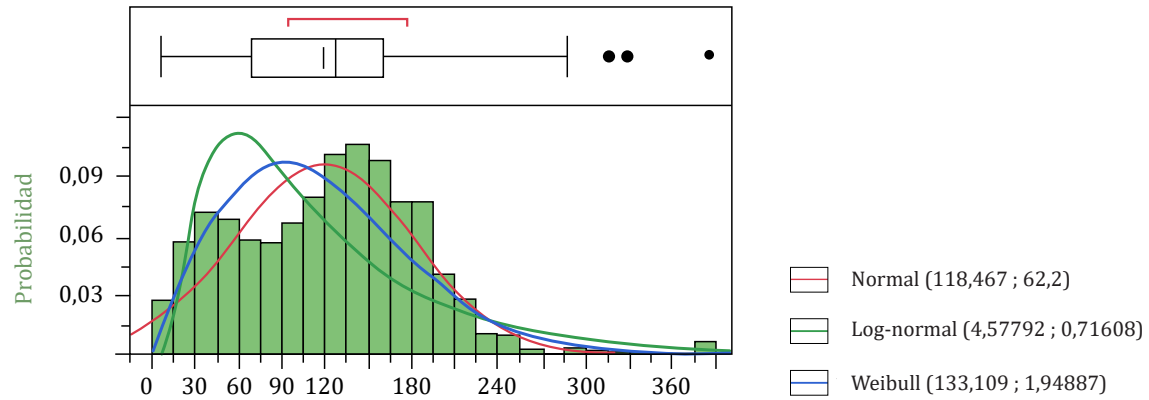
Tipo	Párametro	Estimación	Extremo inferior del IC al 95 %	Extremo superior del IC al 95 %
Escala	α	335,83321	335,80274	335,86368
Forma	β	1,8443771	1,8441529	1,8446014

$$-2\log(\text{verosimilitud}) = 2.208.006.820,09836$$

Gráfico de diagnóstico



C. Incertidumbre del carbono acumulado en biomasa aérea y subterránea (Mg ha⁻¹)



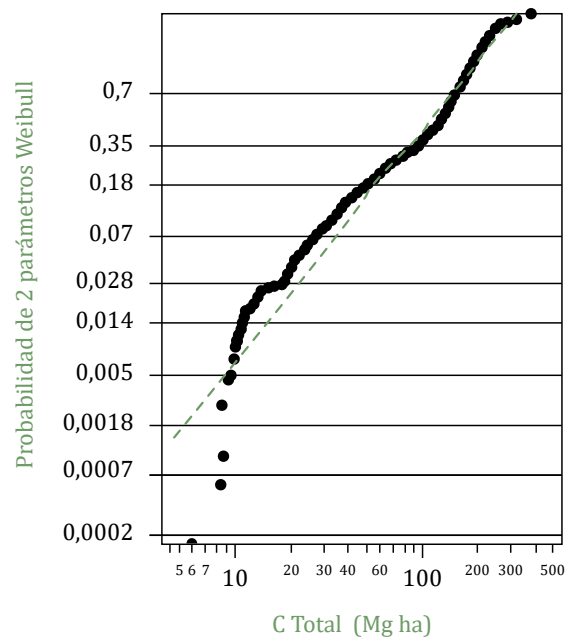
Ajuste de 2 parámetros Weibull

Estimaciones de parámetros

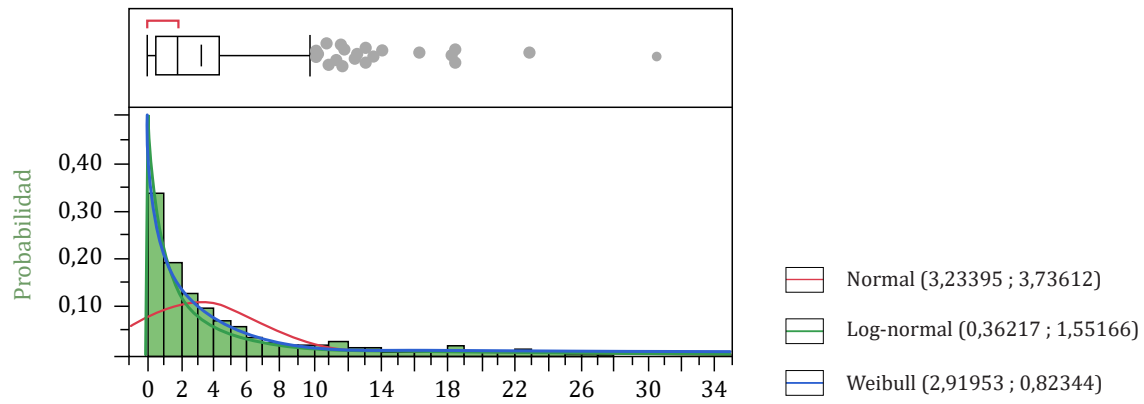
Tipo	Párametro	Estimación	Extremo inferior del IC al 95 %	Extremo superior del IC al 95 %
Escala	α	133,10921	133,09841	133,12001
Forma	β	1,9488734	1,9486368	1,9491101

$-2\log(\text{verosimilitud}) = 1.862.732.244,82597$

Gráfico de diagnóstico



D. Incertidumbre del carbono acumulado en detritos finos (Mg ha^{-1})



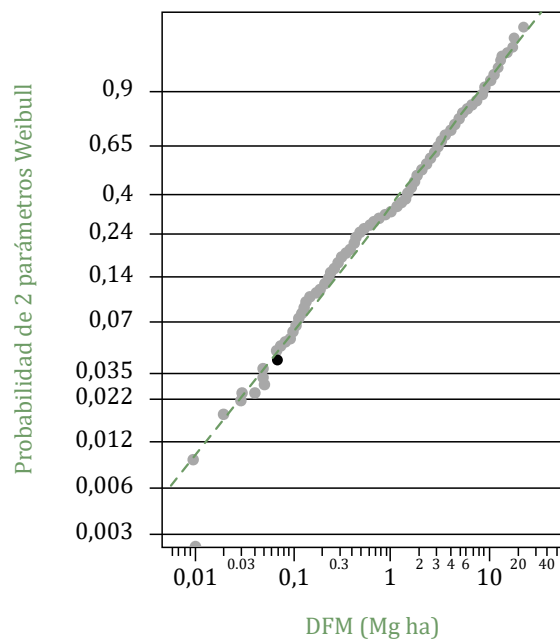
Ajuste de 2 parámetros Weibull

Estimaciones de parámetros

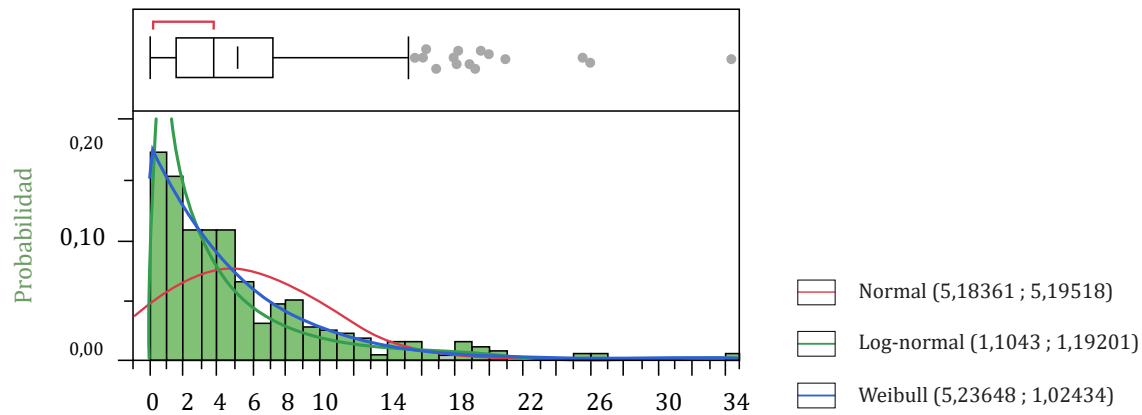
Tipo	Párametro	Estimación	Extremo inferior del IC al 95 %	Extremo superior del IC al 95 %
Escala	α	2,9195283	2,9188121	2,9202446
Forma	β	0,8234377	0,8233128	0,8235626

$-2\log(\text{verosimilitud}) = 446.560.588,867539$

Gráfico de diagnóstico



E. Incertidumbre del carbono acumulado en detritos gruesos (Mg ha^{-1})



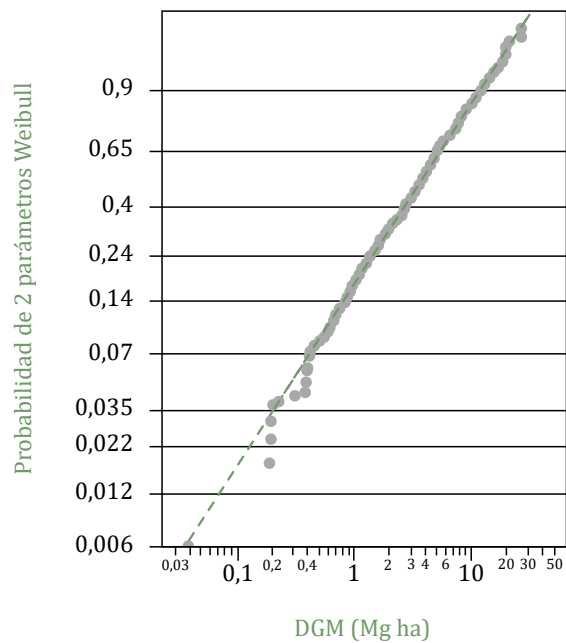
Ajuste de 2 parámetros Weibull

Estimaciones de parámetros

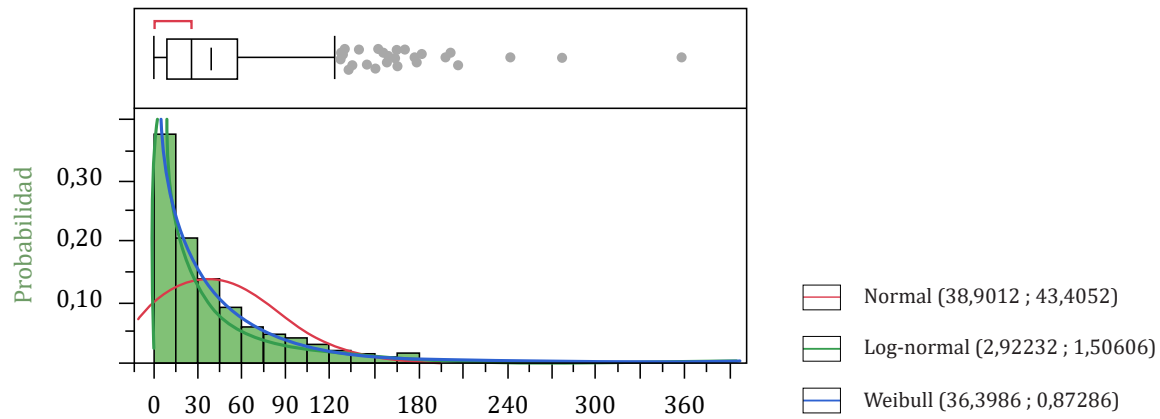
Tipo	Párametro	Estimación	Extremo inferior del IC al 95 %	Extremo superior del IC al 95 %
Escala	α	5,2364798	5,2352486	5,2377113
Forma	β	1,0243375	1,0241572	1,0245178

$-2\log(\text{verosimilitud}) = 389.691.058,136351$

Gráfico de diagnóstico



F. Incertidumbre del carbono acumulado en árboles y tocones muertos (Mg ha⁻¹)



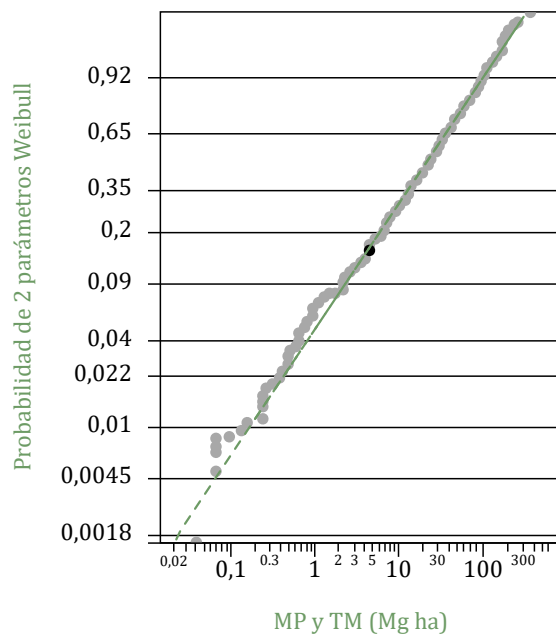
Ajuste de 2 parámetros Weibull

Estimaciones de parámetros

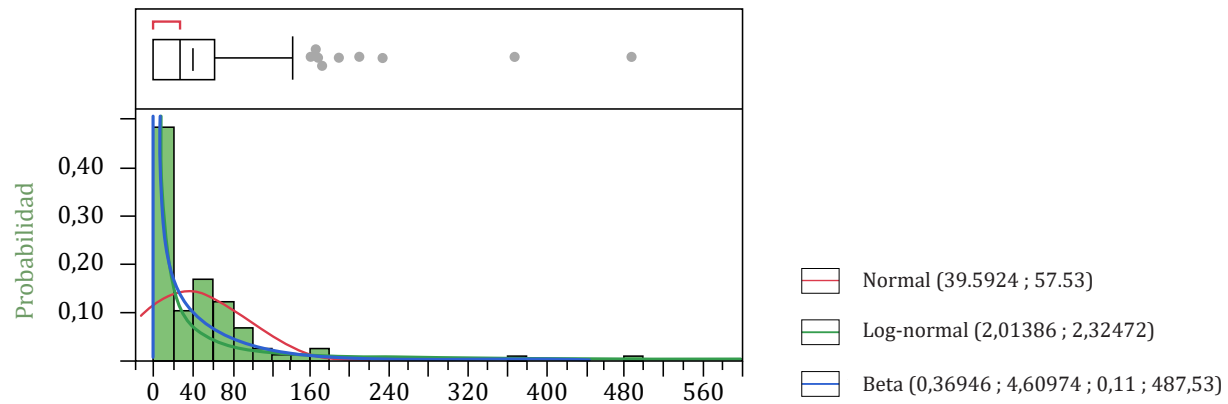
Tipo	Párametro	Estimación	Extremo inferior del IC al 95 %	Extremo superior del IC al 95 %
Escala	α	36,3986	36,391759	36,405442
Forma	β	0,8728572	0,8727499	0,8729644

$-2\log(\text{verosimilitud}) = 1.466.368.526,30353$

Gráfico de diagnóstico



G. Incertidumbre en carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1})



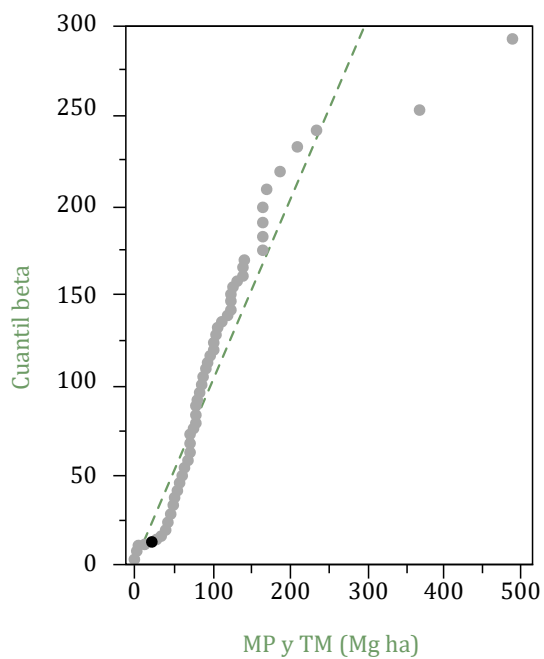
Beta ajustada

Estimaciones de los parámetros

Tipo	Párametro	Estimación	Extremo inferior del IC al 95 %	Extremo superior del IC al 95 %
Forma	α	0,3694562	0,3693888	0,3695236
Forma	β	4,6097385	4,6083715	4,6111059
Umbral	θ	0,11		
Escala	σ	487,53		

$-\log(\text{verosimilitud}) = 1.233.571.545,14575$

Gráfico de diagnóstico



Glosario de términos y acrónimos

Árboles muertos en pie (MP): árboles que han muerto, pero que permanecen en posición vertical y proporcionan hábitat para diversas especies.

Área basal (AB): área de la sección transversal del tronco de un árbol a 1,3 metros del suelo, utilizada para medir la densidad y volumen forestal.

Áreas anidadas: zonas dentro de un área mayor que se utilizan para análisis específicos, que permiten una organización jerárquica.

Áreas forestales: regiones geográficas cubiertas por bosques, selvas o plantaciones, utilizadas para obtener recursos naturales.

Azimet: ángulo horizontal medido desde el norte en el sentido de las agujas del reloj.

Biomasa aérea (AGB): cantidad de masa seca contenida en la materia viva, que se encuentra sobre el suelo.

Biomasa subterránea (BRG): cantidad de masa seca contenida en la materia viva, que se encuentra bajo el suelo.

Biometría forestal: medición y análisis de las características biológicas y físicas de los bosques.

Bosque natural: tierra, ocupada principalmente por árboles, que puede contener arbustos, palmas, guaduas, hierbas y lianas, en la que predomina la cobertura arbórea con una densidad mínima de dosel del 30 %, una altura mínima de dosel (in situ) de 5 metros al momento de su identificación y un área mínima de una hectárea. Se excluyen las coberturas arbóreas de plantaciones forestales comerciales, cultivos de palma y árboles sembrados para la producción agropecuaria.

Carbono orgánico del suelo (COS): carbono almacenado en la materia orgánica del suelo, crucial para la fertilidad y salud del suelo.

Coefficiente de variación (CVE): medida de la variabilidad relativa, calculada como la desviación estándar dividida por la media.

Composición florística: distribución y abundancia de las especies de plantas en un ecosistema forestal.

Conglomerado: unidad de muestreo conformada por cinco subparcelas circulares, dispuestas en forma de cruz de 15 m de radio cada una, con distancia de 80 m entre centros.

Dasometría: ciencia del campo forestal que mide y estima tanto las dimensiones como el crecimiento de los árboles que conforman las masas forestales.

Diámetro a la altura del pecho (DAP): diámetro del fuste de un árbol medido a 1,3 metros del suelo.

Degradación del bosque: disminución de la capacidad del bosque para suministrar bienes y servicios.

Densidad aparente del suelo: relación entre la masa del suelo seco y su volumen total, incluyendo poros, expresada en g/cm³.

Densidad de la madera: relación entre la masa y el volumen de la madera, expresada en kg/m³.

Desviación estándar (SE): medida de la dispersión de los valores en torno a la media.

Detritos de madera: restos de madera en proceso de descomposición provenientes de árboles y plantas.

Detritos finos de madera (DFM): restos de madera en proceso de descomposición provenientes de árboles con diámetro entre 2 y 20 cm.

Detritos finos de madera (DGM): restos de madera en proceso de descomposición provenientes de árboles con diámetro mayor a 20 cm.

Detritos de madera sobre el suelo (DMS): restos de madera en descomposición que se encuentran sobre la superficie del suelo.

Distribución beta: distribución de probabilidad continua definida en el intervalo $[0, 1]$, regida por dos parámetros de forma.

Distribución gaussiana: distribución de probabilidad continua con forma de campana, simétrica respecto a la media.

Distribución Weibull: distribución de probabilidad continua, utilizada para modelar tiempos de vida y fallos, parametrizada por forma y escala.

Diversidad forestal: variedad de especies y ecosistemas dentro de un bosque.

Ecosistemas: conjunto de organismos y su entorno físico, interactuando como una unidad.

Errores estándar: medida de la variabilidad de una estadística muestral.

Error de muestreo: diferencia entre una estadística muestral y el parámetro poblacional real.

Estructura forestal: organización y distribución de los individuos vegetales de un bosque.

Factor de reducción diamétrica (FRD): coeficiente usado para ajustar el diámetro de los árboles en modelos de crecimiento.

Factores de expansión: coeficientes utilizados para convertir datos de muestra en estimaciones de población total.

Factores de emisión: valores que representan la cantidad de contaminantes emitidos por unidad de actividad.

Funciones de probabilidad: funciones matemáticas que describen la probabilidad de diferentes resultados en un experimento aleatorio.

Fustal: individuos con un diámetro normal entre 10 a 30 cm de diámetro.

Fustal grande: individuos con un diámetro normal mayor de 30 cm.

Gases de efecto invernadero: gases que absorben y emiten radiación infrarroja, contribuyendo al calentamiento global.

Helecho arbóreo: planta que carece de flores, con rizoma vertical (tallo) que eleva las frondas por encima del suelo.

ID: abreviatura de identificación.

Imputación: sustitución de valores faltantes en un conjunto de datos.

Índice de esbeltez: relación entre la altura y el diámetro de un árbol.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): organismo de la ONU, que evalúa la ciencia relacionada con el cambio climático.

Inventario Forestal Nacional de Colombia: operación estadística que registra objetivamente variables referidas al bosque natural.

Latizal: individuos con un diámetro normal entre 2,5 y 10 cm de diámetro.

Limpieza de datos: proceso de detectar y corregir errores en un conjunto de datos.

Lineamientos nacionales: directrices establecidas por un gobierno para guiar políticas y acciones en diversos sectores.

Marco geoestadístico (MGE): instrumento de planificación del muestreo y operativo de campo del Inventario Forestal Nacional.

Método de coordinado negativo: técnica de muestreo que selecciona elementos con probabilidades inversas a su inclusión previa.

Monitoreo de bosques: seguimiento sistemático de las dinámicas en los bosques que usa tecnologías como teledetección.

Muestreo aleatorio simple de conglomerados (MASC): técnica de muestreo que selecciona aleatoriamente grupos completos de una población.

Muestreo probabilístico: método de muestreo donde cada elemento de la población tiene una probabilidad conocida y no nula de ser seleccionado.

Necromasa: materia orgánica muerta en un ecosistema, como árboles caídos, ramas y hojas.

Nivel de confianza: probabilidad de que un intervalo contenga el parámetro poblacional verdadero.

Niveles de incertidumbre: medida de la variabilidad o falta de certeza en estimaciones o predicciones.

Niveles de referencia forestal: puntos de referencia para evaluar la reducción de emisiones de deforestación y degradación forestal.

Norma técnica NTCPE 1000:2020: norma que establece requisitos de calidad para la generación y difusión de estadísticas oficiales en Colombia.

Operación estadística: conjunto de actividades para obtener y difundir resultados estadísticos sobre un tema específico.

Periodo de referencia: intervalo de tiempo específico al que se refiere la información estadística.

Pesos específicos: importancia o relevancia asignada a un dato o grupo de datos dentro de un conjunto más grande.

Plataforma de captura: sistema o aplicación para la recolección y gestión de datos.

Programa R: software libre para análisis estadístico y gráficos.

Post-estratificación: diseño de muestreo que considera particiones poblacionales a posteriori del levantamiento.

Punto de observación de la medida (POM): ubicación específica donde se realiza la medición del diámetro en un árbol.

Recursos boscosos: bienes y servicios proporcionados por los bosques.

Región biogeográfica: área geográfica con condiciones ambientales y especies biológicas similares.

Raíz del error cuadrático medio (RMSE): la diferencia entre valores predichos y observados.

Sistema Nacional Ambiental (SINA): conjunto de entidades y normas para la gestión ambiental en Colombia.

SMBYC: Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono en Colombia.

Subparcelas: divisiones más pequeñas dentro de una parcela para estudios detallados.

Sumideros forestales de carbono: bosques que absorben más carbono del que emiten.

Tamaño de muestra: número de observaciones o individuos en una muestra estadística.

Tocones muertos (TM): parte del tronco de un árbol muerto que queda unida a la raíz.

Transectos: líneas rectas a lo largo de las cuales se realizan observaciones o mediciones.

Varianza: medida de la dispersión de un conjunto de datos.

